

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2018.02.09

疏勒河年径流量变化特征分析及模拟

李培都^{1,2,3,4}, 司建华^{1,3,4}, 冯起¹, 赵春彦^{1,2,3,4}, 王春林^{1,2,3,4}

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 101408;
3. 内陆河流域生态水文重点实验室, 甘肃 兰州 730000;
4. 阿拉善荒漠生态水文实验研究站, 内蒙古 阿拉善 735400)

摘要:根据1972—2011年疏勒河年径流量的实测数据,应用倾斜趋势分析、Mann-Kendall突变趋势检验等方法分析了疏勒河年径流量的变化特征,并利用BP神经网络和粒子群-神经网络对其进行了模拟预测。结果表明:昌马堡、党城湾、双塔堡、潘家庄4个站点年径流量均呈增加趋势,年径流量累积距平百分率的倾斜率为每10年分别增加13.87%、4.46%、11.57%、10.49%,年径流量发生显著突变的年份分别为2004、1983、2008、2010年;25a尺度周期是疏勒河流域年径流量变化特征的主控周期。粒子群-神经网络对疏勒河年径流量模拟结果优于BP神经网络,利用优化后的粒子群-神经网络对年径流量进行预测,年降水量在40年均值基础上从增加15%到增加25%时,径流量不会发生显著变化。

关键词:年径流量;变化特征;模拟预测;疏勒河

中图分类号:TV213.4

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2018)02-0052-09

Analysis and simulation on annual runoff variation characteristics of Shule River

LI Peidu^{1,2,3,4}, SI Jianhua^{1,3,4}, FENG Qi¹, ZHAO Chunyan^{1,2,3,4}, WANG Chunlin^{1,2,3,4}

(1. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of sciences, Beijing 101408, China;
3. Key Laboratory of Eco-Hydrology of Inland River Basin, Lanzhou 730000, China;
4. Alxa Desert Eco-Hydrological Experimental Research Station, Alxa 735400, China)

Abstract: Based on the measured data of annual runoff from 1972 to 2011, the annual runoff variation characteristics of 4 catchments in Shule River were analyzed by inclination trend analysis and Mann-Kendall catastrophe trend test, and the BP neural network and particle swarm optimization-neural network were used to simulate the annual runoff prediction. The results indicated that the annual runoff of Changmabao, Dangchengwan, Shuangtapu, and Panjiazhuang are increasing, the slope of annual runoff cumulative anomaly percentage is respectively 13.87%, 4.46%, 11.57%, 10.49% per decade, the annual runoff frequency occur break in the 2004, 1983, 2008 and 2010, respectively. The 25-year scale period is the main control period of the annual runoff in the Shule River Basin. The particle swarm-neural network is more accurate than the Bp neural network during annual runoff simulation. Meanwhile, the annual precipitation will increase from 15% to 25% on the basis of 40 years mean value, and the runoff will not change significantly.

Key words: annual runoff; variation characteristics; simulation and prediction; Shule River

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0400908)

作者简介:李培都(1989—),男,硕士研究生,研究方向为寒区旱区水文水资源。E-mail: lpeidu@126.com。

通信作者:司建华,博士,研究员。E-mail: jianhuas@lzb.ac.cn。

$$u_j = g\left(\sum_j w_{jk} y_{k,\text{out}}\right) \quad (5)$$

式中： y_{jk} 为输入层第 k 神经元输出信号； w_{kj} 为输入层到隐含层的权重； x_j 为标准化处理数据； $y_{k,\text{out}}$ 为第 k 神经单元从输入层接收到输入信号后的输出信号； $y_{jk,\text{in}}$ 为隐含层第 k 神经单元从输入层接收到的输入信号； w_{jk} 为输出层的权重； u_j 为输出层第 j 神经单元的输出信号。

1.2.2 参数优化方法

将粒子群和 BP 神经网络相结合,应用粒子群优化算法计算 BP 神经网络的连接权向量和阈值,即设粒子群的位置向量 $\mathbf{X}$ 的元素是 BP 网络所有节点之间的连接权值和阈值,每次迭代求出最优粒子的权向量和阈值,及 BP 网络在这组权向量和阈值的实际输出值 y_k ,从而第 i 个粒子的适应度函数 f_i 为

$$f_i = \frac{1}{\exp\left[\sum_{k=1}^n \left(y_k - t_k\right)^2\right]} \quad (6)$$

式中： t_k 是 BP 神经网络的目标输出； n 是神经网络输入输出的样本对数。适应度目标函数采用指数形式将使得误差平方和大的粒子的目标值变差。BP 神经网络隐含层数也采用粒子群优化算法进行优化。

1.2.3 模型检验方法

模型模拟精度可用回归估计标准误差 (root mean squared error, RMSE) 进行分析:

$$R_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (O_{\text{bs},i} - S_{\text{im},i})^2}{m}} \quad (7)$$

式中： R_{RMSE} 为回归估计标准误差值； $O_{\text{bs},i}$ 为实际观测值； $S_{\text{im},i}$ 为模型模拟值； m 为样本容量。

1.2.4 模型训练

利用训练样本数据对模型进行学习训练以获得模型的参数,BP 神经网络拓扑结构见图 2。神经网络训练与模拟采用 MATLAB R2010a 软件通过编程实现。在模型训练时,初始学习速率 η 为 0.1,最大循环次数为 1000 次,目标误差不超过 0.001。

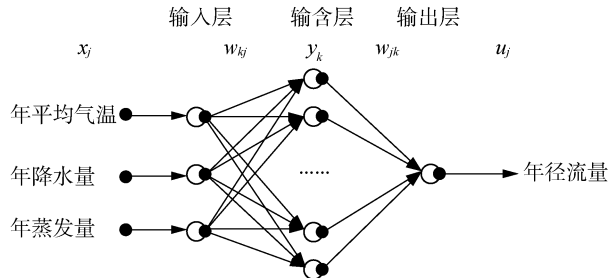
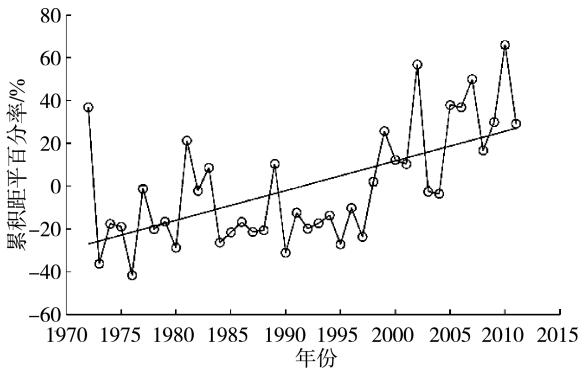


图 2 BP 神经网络拓扑结构

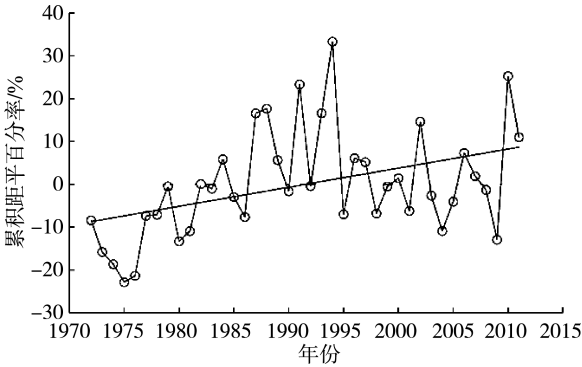
2 结果与分析

2.1 年径流量变化趋势分析

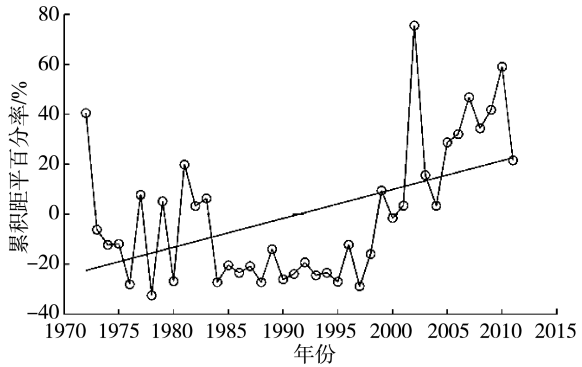
图 3 为年径流量累积距平百分率变化趋势图,趋势线性方程形如 $f(x) = ax + b$, 其中 a 为线性倾



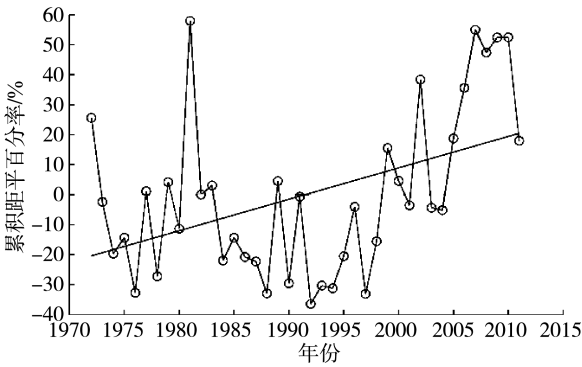
(a) 昌马堡



(b) 党城湾



(c) 双塔堡



(d) 潘家庄

图 3 疏勒河年径流量累积距平百分率变化趋势

斜率, b 为截距,表 1 为线性趋势方程参数。由图 3 和表 1 可以看出,昌马堡年径流量呈增加趋势,年径流累积距平百分率的倾斜率为每 10 年增加 13.87%,最大值出现在 2010 年,累积距平百分率为 66.01%,在 1976 年出现最小值,为 -41.62% ;党城湾年径流累积距平百分率的倾斜率为每 10 年增加 4.46%,在 1994 年出现最大值,为 33.29% ,在 1975 年出现最小值,为 -22.82% ;双塔堡年径流量累积距平百分率的倾斜率为每 10 年增加 11.57%,最大值出现在 2002 年,为 75.52% ,最小值出现在 1978 年,为 -32.54% ;潘家庄径流量累积距平百分率的倾斜率为每 10 年增加 10.49%,在 1981 年出现最大值,为 58.00% ;最小值出现在 1992 年,为 -36.46% 。总体而言,疏勒河的年径流量呈现增加趋势,但每个站点的增长线性倾向率是不同的,从大到小依次为昌马堡、双塔堡、潘家庄和党城湾。

2.2 Mann-Kendall 突变趋势检验

疏勒河流域不同站点的统计量曲线见图 4。昌马堡 UF 统计量曲线在 1997 年以后呈上升趋势,径流量有明显的增多趋势,在 2004 年以后这种趋势超过 0.05 显著水平临界线,表明昌马堡年径流量的上升趋势是十分显著的,根据 UF 和 UB 统计量曲线交点的位置,昌马堡的年径流量发生突变的年份始于 2000 年。党城湾 UF 统计量曲线在 1976—1994 年呈上升趋势,1994 年之后稍有下降,自 1983 年后这种趋势就超过 0.05 显著水平临界线,表明党城湾年径流量的变化趋势是十分显著的,根据 UF 和 UB 统计量曲线交点的位置,党城湾年径流量发生突变的年份始于 1978 年。双塔堡和潘家庄 UF 统计量曲线在 1997 年以后呈上升趋势,径流量有明显的增多趋势,双塔堡在 2008 年后这种趋势超过 0.05 显著水平临界线,而潘家庄在 2010 年后这种趋势超过 0.05 显著水平临界线,表明此趋势变化是十分显著的,双塔堡和潘家庄年径流量发生突变的年份都始于 2005 年。在 UF 统计量曲线变化上,昌马堡、双塔堡和潘家庄表现出一致性和同步性,UF 统计量曲线呈现“W”形变化,表明年径流量的趋势变化比较统一,河流的上游来水与中下游的径流变化密切相关。

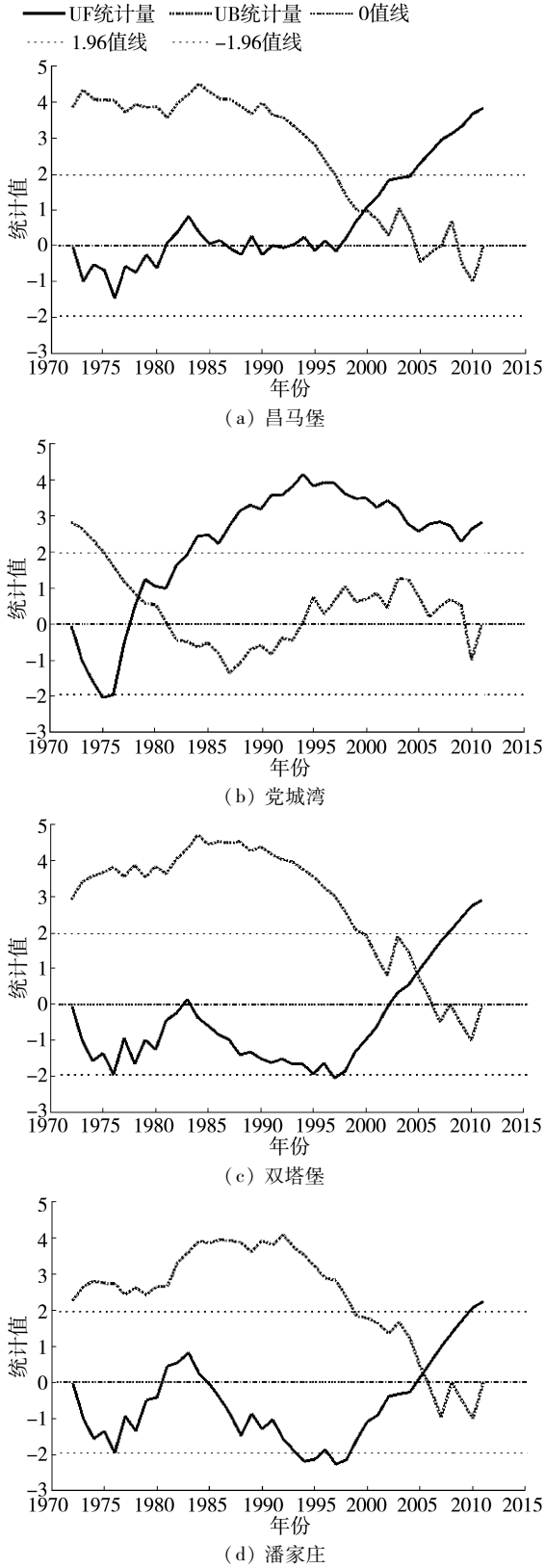


图 4 疏勒河年径流量 Mann-Kendall 统计量曲线

表 1 线性趋势方程参数

站 点	线性方程	a 的 95% 置信区间	b 的 95% 置信区间	R^2	R_{RMSE}
昌马堡	$f(x) = 1.387x - 2762$	(0.7745, 1.9990)	(-3.981, -1.542.0)	0.3562	22.08
党城湾	$f(x) = 0.446x - 888$	(0.1223, 0.7696)	(-1.533, -243.6)	0.1700	11.67
双塔堡	$f(x) = 1.157x - 2305$	(0.4787, 1.8360)	(-3.657, -953.4)	0.2388	24.48
潘家庄	$f(x) = 1.049x - 2088$	(0.3536, 1.7430)	(-3.472, -704.3)	0.1971	25.06

2.3 年径流量周期特征分析

图 5 为疏勒河年径流量小波系数实部等值线图,可以看出,在疏勒年径流周期变化过程中,昌马

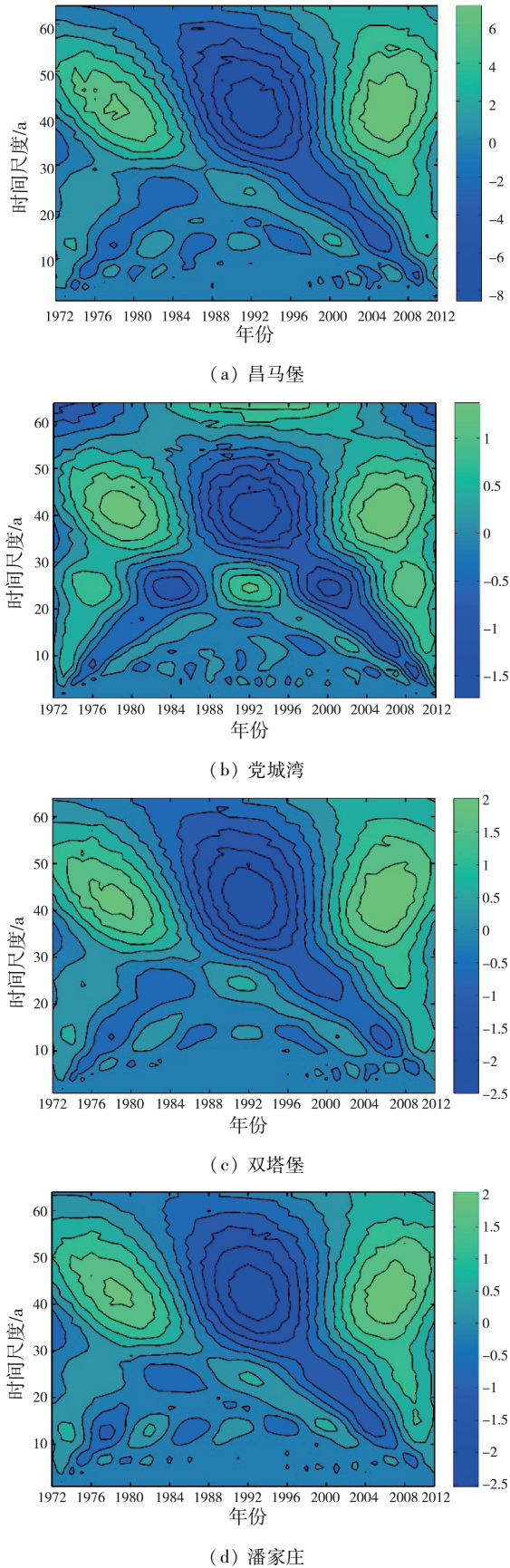


图 5 疏勒河年径流量小波系数实部等值线

堡 30 ~ 60 a 尺度变化特征明显,在研究时间范围内,存在着丰-枯-丰的周期变化;10 ~ 25 a 尺度变化反复交替出现 5 次,占据了很大部分的研究时间;8 ~ 15 a 尺度变化特征频繁,但较为稳定。党城湾存在着 30 ~ 50 a、20 ~ 30 a 和 5 ~ 10 a 尺度变化特征,在 30 ~ 50 a 尺度变化特征中,存在着丰-枯交替的 1.5 次周期变化;20 ~ 30 a 尺度变化在整个研究时段明显,存在着丰-枯交替的 2.5 次周期变化,具有全域性;5 ~ 10 a 小尺度变化较为稳定且具有全域性。双塔堡在 30 ~ 60 a 尺度特征较为显著,对应着 1.5 个周期的丰-枯变化特征。潘家庄在 30 ~ 60 a 尺度特征上存在 1.5 个周期的丰枯振荡变化,10 ~ 15 a 尺度特征也很显著,充斥着整个研究时段,具有全域性。在疏勒河年径流量小波方差图(图 6)中,流域的 4 个站点最大峰值对应的都是 42 a 时间尺度,第二大峰值对应的是 25 a 时间尺度。在主周期分析中,4 个站点的主控周期具有一致性,42 a 时间尺度超出了研究时间域,即 25 a 尺度左右的周期振荡强,控制着疏勒河流域年径流量在整个时间域内的变化特征。总体而言,在研究时段内,流域的 4 个站点 30 ~ 60 a 大尺度特征的丰枯振荡变化较为明显且具有同步性,小尺度变化特征稳定且具有全域性。

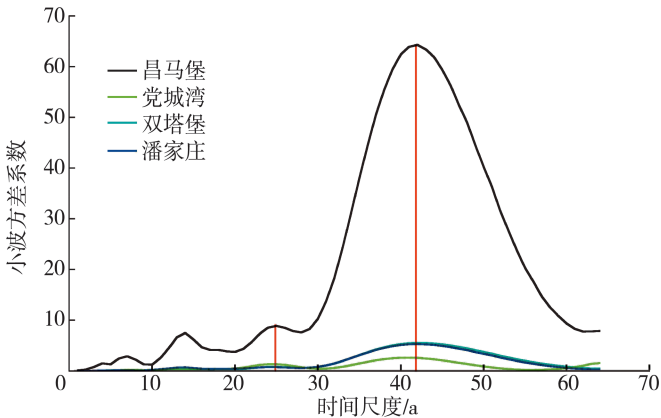
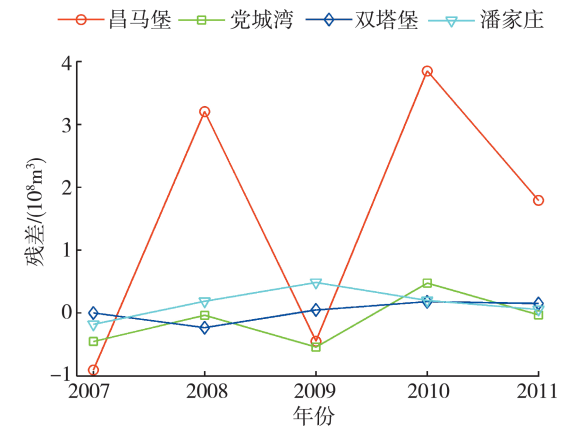


图 6 疏勒河年径流量小波方差

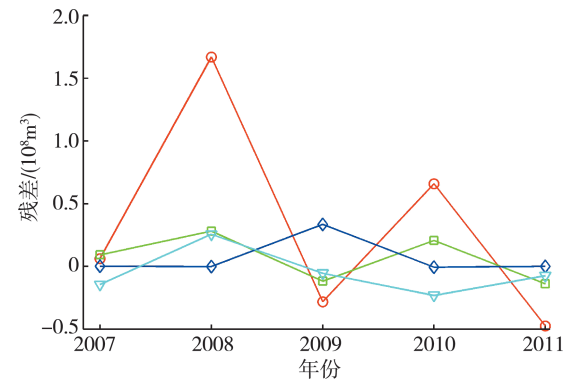
2.4 年径流量模拟

本文研究时段为 1972—2011 年,样本数为 40,将前 35 年的年平均气温、年降水量、年蒸发量作为 BP 神经网络的输入,年径流量作为 BP 神经网络的输出训练模型,剩余 5 年的数据用于模型检验,检验结果见图 7。由图 7 可以看出,BP 神经网络模型残差最大为 3.85 亿 m^3 ,最小为 -0.91 亿 m^3 ,粒子群-神经网络模型残差最大为 1.67 亿 m^3 ,最小为 -0.47 亿 m^3 ;BP 神经网络平均相对误差为 -2.81%,粒子群-神经网络平均相对误差为 -1.14%。可见,粒子群-神经网络对年径流量的模拟结果优于 BP 神经

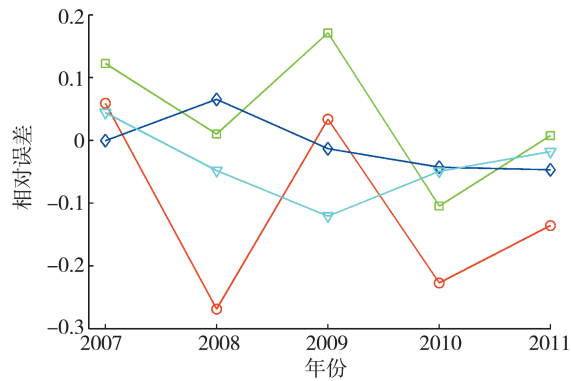
网络,利用参数率定过后的粒子群-神经网络对疏勒河年径流量进行预测。



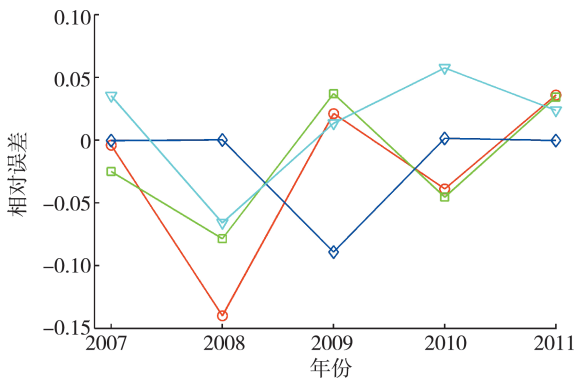
(a) BP 神经网络模型验证残差



(b) 粒子群-神经网络模型验证残差



(c) BP 神经网络模型验证相对误差



(d) 粒子群-神经网络模型验证相对误差

图 7 模型模拟检验结果

已有研究表明西北地区气候由暖干向暖湿变化^[28],在此背景下,本文将研究时段 40 年的年降水量在平均的基础上分别增加 10%、15% 和 25%,在年平均气温和年蒸发量不变的条件下来预测疏勒河年径流量的变化趋势,结果见表 2。从表 2 可以看出,在年降水量变化增加 10% 条件下,4 个站点的径流量变化趋势不一样;当年降水量变化从 15% 增加到 25% 的条件下,年径流量基本不会发生变化。

表 2 年降水量增加前后的径流量变化 10^8 m^3

站 名	径流量			
	40 年年均	降水增加 10% 后	降水增加 15% 后	降水增加 25% 后
昌马堡	10.22	13.13	14.42	14.56
党城湾	3.64	2.38	3.10	3.10
双塔堡	2.65	4.62	2.94	2.90
潘家庄	2.64	7.05	4.48	4.48

3 讨 论

疏勒河是西北内陆河之一,我国西北内陆干旱区降水量少,蒸发量大,发源于高山区的内陆河是绿洲地区的重要水源,已有研究表明,内陆河主要依靠山区的冰雪融水补给。受全球变化的影响,中国西北地区的冰川面积与 20 世纪 50 年代相比减少了 27.2%,如果按照这样的发展趋势,到 2050 年依靠冰雪融水补给的内陆河流淡水资源会严重不足,当地正常的生产和生活将会受到巨大威胁^[29]。对疏勒河的 4 个站点进行了年径流量分析,年径流量呈现增加趋势,这与蓝永超等^[30-31]的研究结果一致。昌马堡、党城湾、双塔堡和潘家庄年径流累积距平百分率的倾斜率依次为每 10 年增加 13.87%、4.46%、11.57% 和 10.49%,主要原因是除了降水的补给外,还有气温升高冰雪融水补给的影响。根据第五次 IPCC 的评估报告,全球气温呈升高趋势^[30],这种变化对冰川、积雪的响应已有部分研究^[32-41],陈仁升等^[42]研究表明疏勒河冰川融水占河流年径流量的 31.4%;蓝永超等^[30]研究表明,疏勒河上游流域山区地势高寒,受人类活动影响较小,气候变化是影响径流的主要因素。

疏勒河流域昌马堡、党城湾、双塔堡和潘家庄 4 个站点年径流量发生较显著突变的年份分别是 2004 年、1983 年、2008 年和 2010 年。在 UF 统计量曲线变化上,昌马堡、双塔堡和潘家庄表现出相似性,UF 统计量曲线呈现“W”形变化,年径流量的趋势变化也比较统一,表明河流中下游的径流变化与上游来水密切相关,同时由于径流量的变化是自然

因素和人为因素共同相互作用的结果,如地形地貌、气候变化和人类生产生活用水等,致使开始发生突变的年份不一致,具体原因需进一步研究。

在主周期分析中,4个站点的主周期具有一致性,25 a 尺度左右的周期振荡强,控制着疏勒河流域年径流量在整个时间域内的变化特征。在研究时段内,流域的4个站点30~60 a 大尺度特征的丰枯振荡变化较为明显且具有同步性,小尺度变化特征稳定且具有全域性。

在对径流量的模拟过程中,粒子群-神经网络的模拟结果要优于BP神经网络的模拟结果,这与陶海龙等^[25]利用此方法对黄河三门峡径流量的预测结果一致,对昌马堡、党城湾、双塔堡、潘家庄4个站点模拟值与实际观测值间的决定系数基本为0.85以上。当年降水量40年均值发生变化,从增加15%到增加25%时,年径流量几乎不会再增加。粒子群-神经网络避免了BP神经网络易陷入局部最优、精度不高和搜索质量差的缺点^[43],改善了网络的泛华能力,加快了收敛速度,提高了年径流量模拟预测的精度,更适合用于年径流量的模拟预测。但是粒子群-神经网络是黑箱模型,不能从机理上揭示径流量的变化过程,渗漏、蒸发等物理变化均不能用此模型进行表征量化,需要从机理方面进一步开发径流模拟预测模型,为水资源管理和保护提供理论依据和技术支撑。

4 结 论

a. 疏勒河年径流量呈增加趋势,昌马堡、党城湾、双塔堡和潘家庄年径流累积距平百分率的倾斜率依次为每10年增加13.87%、4.46%、11.57%和10.49%。在突变分析中,昌马堡、党城湾、双塔堡和潘家庄年径流量发生显著突变的年份分别为2004年、1983年、2008年和2010年。

b. 在研究时间域内,25 a 尺度周期是疏勒河流域年径流量变化特征的主控周期。在年径流量模拟预测中,粒子群-神经网络的模拟结果优于BP神经网络的模拟结果,当年降水量40年均值发生变化,从增加15%到增加25%时,年径流量几乎不会再增加。

参考文献:

[1] 宋小燕,穆兴民,高鹏,等. 松花江哈尔滨站近100年来径流量变化趋势[J]. 自然资源学报,2009,24(10): 1803-1809. (SONG Xiaoyan, MU Xingmin, GAO Peng, et al. Trends of runoff variation from 1900 to 2005 at Harbin Station of Songhua River [J]. Journal of Natural

Resources,2009,24(10):1803-1809. (in Chinese))

[2] 吴昊,华骅,王腊春,等. 区域用水结构演变及驱动力分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(6): 477-484. (WU Hao, HUA Hua, WANG Lachun, et al. Analysis of change and driving forces of regional water consumption structure [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(6): 477-484. (in Chinese))

[3] 田贵良,顾巍,谢文轩. 基于虚拟水贸易战略的缺水地区用水结构优化研究[J]. 水利经济,2013,31(1):1-6. (TIAN Guiliang, GU Wei, XIE Wenxuan. Optimization of water use structure in water shortage region based on virtual water trade strategy [J]. Journal of Economics of Water Resources,2013,31(1):1-6. (in Chinese))

[4] LABAT D, GODDÉRIIS Y, PROBST J L, et al. Evidence for global runoff increase related to climate warming[J]. Advances in Water Resources,2004,27(6):631-642.

[5] 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[J]. 水科学进展,2010,21(6):765-770. (YAO Yunlong, LYU Xianguo, WANG Lei, et al. A quantitative analysis of climate change impacts on runoff in Naoli River [J]. Advances in Water Sciences,2010,21(6):765-770. (in Chinese))

[6] 张光辉. 全球气候变化对黄河流域天然径流量影响的情景分析[J]. 地理研究,2006,25(2):268-275. (ZHANG Guanghui. Analysis of potential effects of global climate change on natural runoff in the Yellow River Basin [J]. Geographical Research,2006,25(2):268-275. (in Chinese))

[7] 张调风,朱西德,王永剑,等. 气候变化和人类活动对湟水河流域径流量影响的定量评估[J]. 资源科学,2014,36(11):2256-2262. (ZHANG Tiaofeng, ZHU Xide, WANG Yongjian, et al. The impact of climate variability and human activity on runoff changes in the Huangshui River Basin [J]. Resources Science,2014,36(11):2256-2262. (in Chinese))

[8] 何旭强,张勃,孙力炜,等. 气候变化和人类活动对黑河上中游径流量变化的贡献率[J]. 生态学杂志,2012,31(11):2884-2890. (HE Xuqiang, ZHANG Bo, SUN Liwei, et al. Contribution rates of climate change and human activity on the runoff in upper and middle reaches of Heihe River Basin [J]. Chinese Journal of Ecology,2012,31(11):2884-2890. (in Chinese))

[9] 王随继,闫云霞,颜明,等. 皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析:累积量斜率变化率比较方法的提出及应用[J]. 地理学报,2012,67(3):388-397. (WANG Suiji, YAN Yunxia, YAN Ming, et al. Contributions of precipitation and human activities to the runoff change of the Huangfuchuan Drainage Basin: application of comparative method of the slope changing ratio of cumulative quantity [J]. Acta Geographica Sinica,

- 2012,67(3):388-397. (in Chinese))
- [10] 王义民,于兴杰,畅建霞,等. 基于 BP 神经网络马尔科夫模型的径流量预测[J]. 武汉大学学报(工学版), 2008,41(5):14-17. (WANG Yimin,YU Xingjie,CHANG Jianxia, et al. Prediction of runoff based on Bp neural network and Markov model[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2008,41(5):14-17. (in Chinese))
- [11] 王秀杰,封桂敏,耿庆柱. 小波分析组合模型在日径流预测中的应用研究[J]. 自然资源学报,2014,29(5): 885-893. (WANG Xiujie,FENG Guimin,GEN Qingzhu. Application on research on combined models based on wavelet analysis in prediction of daily runoff[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29 (5) : 885-893. (in Chinese))
- [12] 汪丽娜,李粤安,陈晓宏. 基于支持向量机的降雨:径流预测研究[J]. 水文,2009,29(1):13-16. (WANG Lina, LI Yunan, CHEN Xiaohong. Prediction of rainfall-runoff based on support vector mechine method[J]. Journal of China Hydrology,2009,29(1):13-16. (in Chinese))
- [13] 郭俊,周建中,张勇传,等. 基于改进支持向量机回归的日径流预测模型[J]. 水力发电,2010,36(3):12-15. (GUO Jun,ZHOU Jianzhong,ZHANG Yongchuan, et al. Daily runoff forecast based on improved support vector machine regression model [J]. Water Power, 2010, 36 (3):12-15. (in Chinese))
- [14] 徐留兴,梁川,秦远清. 改进的 Elman 模型在紫坪铺月径流预测中的应用[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2006,38(03):38-42. (XU Liuxing, LIANG Chuan, QIN Yuanqing. The monthly runoff prediction of Zipingpu by improved Elman model[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition) 2006,38(3):38-42. (in Chinese))
- [15] 张楠,夏自强,江红. 基于多因子量化指标的支持向量机径流预测[J]. 水利学报,2010,41(11):1318-1324. (ZHANG Nan, XIA Ziqiang, JIANG Hong. Prediction of runoff based on the multiple quantity index of SVM[J]. Shuili Xuebao,2010,41(11):1318-1324. (in Chinese))
- [16] 闻昕,丁紫玉,方国华,等. 气候变化下新安江-富春江水电站径流响应模拟及适应性调度研究[J]. 水资源保护,2017,33(4):10-19. (WEN Xin,DING Ziyu,FANG Guohua, et al. Study on runoff response simulation and adaptive scheduling of Xin'anjiang-Fuchunjiang hydropower station under climate change [J]. Water Resources Protection,2017,33(4):10-19. (in Chinese))
- [17] 顾海燕,徐文科,于雷. 基于 BP 神经网络的河川年径流量预测[J]. 东北林业大学学报,2007,35(10):83-85. (GU Haiyan,XU Wenke,YU Lei. Prediction of annual runoff in Songhua River Valley based on Bp neural networks[J]. Journal of Northeast Forestry Uinversity, 2007,35(10):83-85. (in Chinese))
- [18] 韩勇,万水玲. 基于 Matlab 神经网络的流域年径流量预测[J]. 水利科技与经济,2010,16(4):373-375. (HAN Yong,WAN Shuiling. River annual runoff forecast based on matlab atificial neural network [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy,2010, 16(4):373-375. (in Chinese))
- [19] 何强,宗永臣,张建新. 基于 BP 神经网络的黄河利津水文站天然年径流量的预测与分析[J]. 内江科技, 2007,28(12):82-83. (HE Qiang,ZONG Yongchen, ZHANG Jianxin. Prediction of annual runoff in Lijin hydrological station of Yellow River based on Bp neural networks[J]. Neijiang Keji, 2007, 28 (12) : 82-83. (in Chinese))
- [20] 雷晓云,张丽霞,梁新平. 基于 MATLAB 工具箱的 BP 神经网络年径流量预测模型研究:以塔城地区乌拉斯台河为例[J]. 水文,2008,28(1):43-46. (LEI Xiaoyun, ZHANG Lixia, LIANG Xinping. Study on the forecast model of annual runoff base on an annual runoff forecasting model of Bp neural network based on matlab toolbox [J]. Journal of China Hydrology,2008,28(1):43-46. (in Chinese))
- [21] 胡宾,崔广柏,朱灵芝. BP 神经网络预测河流月径流量[J]. 浙江水利科技,2007,2(25):15-19. (HU Bin,CUI Guangbai, ZHU Lingzhi. Prediction of monthly runoff based on Bp neural network[J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2007,2(25):15-19. (in Chinese))
- [22] 魏光辉. 基于 RBF 神经网络的河川年径流量预测[J]. 西北水电,2014(5):6-9. (WEI Guanghui. Prediction of annual runoff volume in river based on RBF neural network[J]. Northwest Hydropower, 2014 (5) : 6-9. (in Chinese))
- [23] 王其虎,钱新,张玉超,等. BP 神经网络在流溪河水库径流量预测中的应用[J]. 环境保护科学,2010,36(3):19-21. (WANG Qihu,QIAN Xin,ZHANG Yuchao, et al. Application of BP neural network model in forecasting runoff of Liuxihe Reservoir[J]. Environmental Protection Science,2010,36(3):19-21. (in Chinese))
- [24] 宋昭义,李绅东,代堂刚. 昭通横江流域年径流预测[J]. 水资源保护,2017,33(3):9-12. (SONG Zhaoyi,LI Shendong,DAI Tangtang. Prediction of annual runoff over Hengjiang River Basin in Zhaotong City [J]. Water Resources Protection,2017,33(3):9-12. (in Chinese))
- [25] 陶海龙,黄卫东,颜帮琼,等. 基于遗传算法的 BP 网络在黄河三门峡年径流量预测中的应用[J]. 水文,2012,32(3):34-37. (TAO Hailong, HUANG Weidong, YAN Bangqiong, et al. Application of GA-based Bp network in annual runoff prediction at Sanmenxia of Yellow River [J]. Journal of China Hydrology,2012,32(3):34-37. (in Chinese))
- [26] 崔东文. 改进 Elman 神经网络在径流预测中的应用[J]. 水利水电工程学报,2013(2):71-77. (CUI Dongwen. An improved Elman neural network and its

- p application to runoff forecast [J]. Hydro-Science and Engineering, 2013(2): 71-77. (in Chinese))
- [27] 雷文娟. 疏勒河流域水资源优化配置研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- [28] 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[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152-164. (SHI Yafeng, SHEN Yongping, LI Dongliang, et al. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in Northwest China [J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(2): 152-164. (in Chinese))
- [29] 秦大河, 丁一汇, 王绍武, 等. 中国西部环境演变及其影响研究[J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 321-328. (QIN Dahe, DING Yihui, WANG Shaowu, et al. A study of environment change and its impacts in Western China [J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(2): 321-328. (in Chinese))
- [30] 蓝永超, 胡兴林, 肖生春, 等. 近 50 年疏勒河流域山区的气候变化及其对出山径流的影响[J]. 高原气象, 2012, 31(6): 1636-1644. (LAN Yongchao, HU Xinglin, XIAO Shengchun, et al. Study on climate change in mountainous region of Shule River basin in past 50 years and its effect to mountainous runoff [J]. Plateau Meteorology, 2012, 31(6): 1636-1644. (in Chinese))
- [31] 李计生, 胡兴林, 黄维东, 等. 河西走廊疏勒河流域出山径流变化规律及趋势预测[J]. 冰川冻土, 2015, 37(3): 803-810. (LI Jisheng, HU Xinglin, HUANG Weidong, et al. Variation and trend prediction of the mountain runoffs of the trunk streams of the Shule River basin, Hexi Corridor [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(3): 803-810. (in Chinese))
- [32] STOCKER T, QIN D, PLATTNER G, et al. Climate change 2013: the physical science basis. [C]//IPCC. Proceeding of contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Bern: IPCC, 2013.
- [33] 杜建括, 辛惠娟, 何元庆, 等. 玉龙雪山现代季风温冰川对气候变化的响应[J]. 地理科学, 2013, 33(7): 890-896. (DU Jiankuo, XIN Huijuan, HE Yuanqing, et al. Response of modern monsoon temperate glacier to climate change in Yulong Mountain [J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(7): 890-896. (in Chinese))
- [34] 李忠勤, 沈永平, 王飞腾, 等. 冰川消融对气候变化的响应: 以乌鲁木齐河源 1 号冰川为例[J]. 冰川冻土, 2007, 29(3): 333-342. (LI Zhongqin, SHEN Yongping, WANG Feiteng, et al. Response of glacier melting to climate change [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(3): 333-342. (in Chinese))
- [35] 吕卉. 近 40 年喜马拉雅山冰川波动对气候变化的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [36] 马丽娟, 赵景峰, 张宏俊, 等. 气候变化背景下冰川积雪融水对博斯腾湖水位变化的影响[J]. 干旱区地理, 2010, 32(2): 210-216. (MA Lijuan, ZHAO Jingfeng, ZHANG Huijun, et al. Impact of glacier and snow melting on Bosten Lake under climate change [J]. Arid Land Geography, 2010, 32(2): 210-216. (in Chinese))
- [37] 穆振侠, 姜卉芳. 新疆阿克苏河流域昆马力克河积雪消融规律对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2012, 34(6): 1284-1292. (MU Zhenxia, JIANG Huifang. The response of snow cover ablation to climate change in the Kumalik River Basin, Southern Xinjiang [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(6): 1284-1292. (in Chinese))
- [38] 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. (in Chinese))
- [39] 沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(II): 灾害效应[J]. 冰川冻土, 2013, 35(6): 1355-1370. (SHEN Yongping, SU Hongchao, WANG Guoya, et al. The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang (II): hazards effects [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(6): 1355-1370. (in Chinese))
- [40] 王秀娜. 近 40 年来南阿尔泰山地区现代冰川变化及对气候变化的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- [41] 杨兴国, 秦大河, 秦翔. 冰川/积雪-大气相互作用研究进展[J]. 冰川冻土, 2012, 34(2): 392-402. (YANG Xingguo, QIN Dahe, QIN Xiang. Progress in the study of interaction between ice/snow and atmosphere [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(2): 392-402. (in Chinese))
- [42] 陈仁升, 康尔泗, 蓝永超, 等. 河西地区近 50 年来年径流、降水和气温变化趋势分析[J]. 干旱区资源与环境, 2001, 15(4): 51-56. (CHEN Rensheng, KANG Ersi, LAN Yongchao, et al. Variance tendency of annual runoff, precipitation and temperature in Hexi Region in 50 years [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2001, 15(4): 51-56. (in Chinese))
- [43] 崔东文. 文山州近 10 年水资源利用效率评价 SLC-PP 模型及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(2): 129-136. (CUI Dongwen. SLC-PP model and its application to evaluation of water use efficiency in Wenshan Prefecture in last ten years [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(2): 129-136. (in Chinese))

(收稿日期: 2017-03-13 编辑: 王 芳)