

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtj.2018.0062

高瑞忠,白勇,刘廷玺,等.内蒙古高原典型草原内陆河流域径流的时序演变特征[J].南水北调与水利科技,2018,16(3):10-17. GAO R Z, BAI Y, WANG X X, et al. Evolution characteristics of runoff in the typical grassland inland river basin of Inner Mongolia Plateau[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(3): 10-17. (in Chinese)

内蒙古高原典型草原内陆河流域径流的时序演变特征

高瑞忠^{1,2}, 白勇¹, 刘廷玺^{1,2}, 王喜喜³, 王威娜¹

(1. 内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018;

2. 内蒙古水资源保护与利用重点实验室, 呼和浩特 010018; 3. 美国欧道明大学, 诺福克 23529)

摘要: 高原内陆河在我国半干旱地区社会经济发展的区域水资源开发利用过程中起到了重要的支撑作用, 认识其演变特征及进行模拟对于流域的可持续发展具有重要的意义。以内蒙古高原典型草原内陆河流域——巴拉格尔河流域为研究对象, 基于1959—2015年的水文、气象和社会经济等数据, 采用双累积曲线法、累积距平法、改进的M-K趋势检验法和小波变换法对流域径流序列的变化特征进行了解析, 并通过细化降水特征因素影响和以社会经济指标量化人类活动影响, 运用统计相关检验法筛选径流时序演变模拟的主要输入要素, 以改进的BP神经网络实现了水文年、季尺度下径流的时序演变模拟。结果表明: 巴拉格尔河流域径流量在年、季尺度下呈现显著减少趋势; 径流变化的突变年份为1998年, 在这之前受到气候变化为主的影响, 而在这之后为加入人类活动的双重影响; 年、枯水季径流序列均存在6a和30a周期, 而丰水季径流在分析序列内无明显周期变化; 降水指标中的降水量、降水天数和降水次数, 气候因素中的蒸发和相对湿度, 以及人类活动的所有指标是与径流显著相关的影响因素; 在无法实现分布式水文模拟时, 改进的BP神经网络可以较好地模拟该流域径流的时序演变过程。

关键词: 时序演变; 径流; 改进的BP神经网络; 小波变换法; 高原内陆河

中图分类号: P333 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2018)03-0010-08

Evolution characteristics of runoff in the typical grassland inland river basin of Inner Mongolia Plateau

GAO Ruizhong^{1,2}, BAI Yong¹, LIU Tingxi^{1,2}, WANG Xixi³, WANG Weina¹

(1. Water Conservancy and Civil Engineering College of Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

2. Inner Mongolia Key Laboratory of Water Resources Protection and Utilization, Hohhot 010018, China;

3. Old Dominion University, Norfolk, Virginia, USA 23529)

Abstract: Inland river plays an important role in the social and economic development and regional water resources utilization in semi arid plateau areas of China. To recognize and simulate its evolution characteristics is very significant for the basin's sustainable development. In this paper, Balager river basin was selected as the study object. Based on the hydrological, meteorological, and socio economic data in 1959-2015, we analyzed the characteristics of the runoff series by the double mass curve method, the cumulative departure method, the improved M-K trend test, and the wavelet transform method. We used statistical correlation test to select the main input factors for runoff evolution simulation, and realized the simulation of annual and seasonal runoff series evolution by BP artificial network. The results showed that the runoff decreased significantly at the annual and seasonal scale. The abrupt change of runoff occurred in 1998, before which the runoff was mainly influenced by climate change, while after which by both human activities and climate change. There was a 6 year period and a 30 year period for the annual and dry season runoff, yet the wet season runoff showed no obvious periodic change. The impact factors significantly correlated with

收稿日期: 2017-11-27 修回日期: 2018-04-15 网络出版时间: 2018-05-03

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180503.1036.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51469019); 内蒙古科技计划项目(2017); 美国国家自然科学基金(100653010)

Funds: National Natural Science Foundation of China (51469019); Inner Mongolia Science and Technology Project (2017); National Science Foundation of the United States (100653010)

作者简介: 高瑞忠(1977-), 男, 内蒙古阿拉善人, 副教授, 博士, 主要从事水资源评价、生态水文过程模拟等教学与科研工作。E-mail: ruizhonggao@qq.com

runoff included precipitation quantity, wet days, number of precipitation events, evaporation, relative humidity, and all indicators of human activity. The improved BP neural network can well simulate the evolution of runoff in this basin when the distributed hydrological simulation cannot be realized.

Key words: temporal evolution; runoff; the improved BP neural network; wavelet transform method; inland river on plateau

近年来,随着全球气候变化和人类活动影响的加强,部分河流的径流量发生了显著变化,这在我国北方半干旱地区的高原内陆河流域尤为明显^[1-2],这些变化或影响在一定程度上导致流域水资源时空上再分布、水循环改变和降水极端事件与山洪灾害发生,因此,变化环境下河川径流的变化特征、影响分析和模拟等方面的研究已经成为国内外学者关注的热点^[1-5]。如王亮等^[1]研究发现近50年滦河流域内蒙段河川径流呈明显下降趋势,并以SWAT模型对其进行了模拟预测;王威娜等^[2]采用累积距平法、双累积曲线和累积量斜率变化率法对锡林河流域径流和气候变化特征及趋势进行了分析,定量评估了气候变化和人类活动对径流量变化的影响;刘兆飞等^[3]利用Mann-Kendall法和小波分析法对太湖流域1957-2009年气象数据和径流量的变化趋势和周期特征进行了研究;张勃等^[4]对莺落峡径流量进行模拟预测,为黑河流域未来水资源的合理调度及上下游制定合理的分水方案提供了依据;朱颖洁等^[5]基于神经网络模拟的年径流结果,定量分析了气候变化和人类活动对西江梧州站径流变化的影响程度。可以看出,对于径流变化特征分析和模拟预测的研究多数集中在我国主要河流及其支流,而对于资料相对缺乏的高原内陆河草原流域却少有文献报道,也没有针对该类流域从定量的角度进行细致科学的分析和探讨,因此,本文以内蒙古高原内陆河典型草原流域——巴拉格尔河流域为研究对象,基于流域水文、气象和社会经济等数据,利用累积距平^[6,7]、降水-径流双累积曲线^[8,10]、改进的Mann-Kendall趋势检验^[11,17]、小波变换^[5,18-19]等方法对巴拉格尔河流域径流演变规律进行分析,并对径流时序演变过程进行模拟,旨在为内蒙古高原典型草原内陆河流域的水资源可持续利用和有效配置提供参考依据,对理解和认识变化环境下高原内陆河草原流域的生态水文过程及演变规律具有一定的现实意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

巴拉格尔河流域(116°21' - 119°31' E, 43°57' - 45°23' N)位于内蒙古锡林郭勒盟东部的西乌珠穆

沁旗境内,流域面积5350 km²,海拔高度885~1876 m,平均地形坡度0.07(图1)。流域植被是以羊草和针茅为主的典型草原,土壤类型是以砂和粉砂为主的砂壤土,含有少量黏土。流域气候为典型的大陆性气候,冬季严寒、夏季炎热,年均降水量334 mm,大部分降水来自6月-9月的降雨和10月-次年1月的降雪,流域年均蒸发量1149 mm,远大于平均年降水量,平均气温1.2℃,夏季最高气温37.5℃,冬季最低-38.5℃,平均风速15 km/h。流域内主要经济为畜牧业,以及少量的工业。

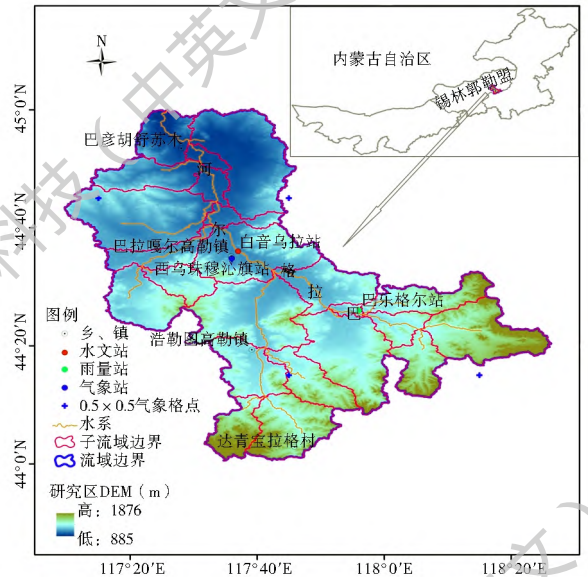


图1 巴拉格尔河流域地理位置及水文气象站点分布
Fig. 1 The locations of Balager river and hydro-meteorological stations

1.2 数据来源

本文主要使用了巴拉格尔河流域的气象、水文和社会经济等数据。气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),主要为西乌珠穆沁旗气象站1959-2015年日数据,其中包括平均气温、相对湿度、降水量、风速、日照时数、蒸发量等数据,鉴于内陆河流域气象站点少,又以国家气象信息中心气象资料实验室建立的0.5°×0.5°降水格点月值数据^[20]作为补充。每个气象序列包含20819个日数据,经检验,除了蒸发量的缺测率为10.6%以外,其他气象要素的缺测率均小于0.35%。本研究对缺测数据采用线性回归和代表年分析进行了插补。气象数据无明显突变点和随机变化,数据变化相对一致,可以代表流

域气候状况。水文数据来源于内蒙古水文总局,为 1959-2015 年白音乌拉站的日径流序列实测数据,资料序列完整。社会经济数据来源于锡林郭勒盟西乌珠穆沁旗政府统计年鉴,包括人口、国内生产总值(GDP)、第一产业产值(PIP)、第二产业产值(SIP)、第三产业产值(TIP)和牲畜数目等。研究区子流域划分、水系、气象站点及水文站点分布见图 1。

1.3 研究方法

1.3.1 径流演变的突变点检测

对于突变点的划分有很多方法,常用的有双累积曲线法、累积距平法、有序聚类分析法和 Manr Kendall 法等,本文使用双累积曲线法和累积距平法。累积距平法可以较为直观地反映水文序列的突变年份,其计算公式为:

$$\hat{X}_t = \sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x}), t = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

式中: \hat{X}_t 为序列 x 在第 t 年的累积距平值; x_i 为序列 x 第 i 年的数值; n 为序列长度(a); \bar{x} 为序列 x 的平均值。

1.3.2 径流演变的趋势检测

Manr Kendall 法已广泛应用于水文气象时间序列的趋势分析中,为了解决因序列正相关性增加趋势显著性的机率而导致趋势误判的问题, Hamed 等^[1]提出了考虑时间序列滞后自相关性的改进 Manr Kendall 趋势检测方法,并在实践中证明了有效性。这里采用该法来检测研究区径流序列在显著水平 $\alpha = 0.05$ 时的趋势性,主要计算过程为: (1) 计算径流序列 $\{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\}$ 的 Sen 斜率 Q ; (2) 原始序列 $\{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\}$ 减去 Q 得到去趋势序列 $\{Y'_1, Y'_2, \dots, Y'_n\}$, 对其按数值从小到大赋予序号 1 到 n , 进而得到一个新的序列 $\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$; (3) 计算序列 $\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 滞后 i 步的自相关系数 $\rho(i)$, 并进行显著性水平 $\alpha = 0.05$ 的 t 检验; (4) 计算 $\frac{n}{n_s}$ 比值和方差 $\text{Var}^*(S)$; (5) 计算 Manr Kendall 统计变量 S ; (6) 计算改进的 Manr Kendall 统计变量 Z^* ; (7) 径流序列趋势判定: 当 Z^* 为正值时,说明径流序列为增加趋势; 当 Z^* 为负值时,说明径流序列为减少趋势。 Z^* 大于标准正态 95% 分位数时,表明径流序列在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 时存在显著趋势。主要计算公式如下:

$$Q = \begin{cases} T_{\frac{m+1}{2}} & m \text{ 为奇数} \\ \frac{T_{\frac{m}{2}} + T_{\frac{m+1}{2}}}{2} & m \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (2)$$

$$\rho(i) = \frac{\sum_{k=1}^{n-i} (y_k - \bar{y})(y_{k+i} - \bar{y}_{k+i})}{\left[\sum_{k=1}^{n-i} (y_k - \bar{y})^2 (y_{k+i} - \bar{y}_{k+i})^2 \right]^{0.5}} \quad i = 1, 2, \dots, n-3 \quad (3)$$

$$t_i = \frac{\rho(i)}{\sqrt{\frac{1 - [\rho(i)]^2}{n - i - 2}}} \quad i = 1, 2, \dots, n-3 \quad (4)$$

$$\frac{n}{n_s} = 1 + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \cdot \sum_{i=1}^{n-3} [(n-i)(n-i-1)(n-i-2) \cdot \rho(i)] \quad (5)$$

$$\text{Var}^*(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^n [m_p(m_p-1)(2m_p+5)]}{18} \cdot \frac{n}{n_s} \quad (6)$$

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(Y_j - Y_k) \quad (7)$$

$$\text{sign}(Y_j - Y_k) = \begin{cases} 1 & \text{if } Y_j > Y_k \\ 0 & \text{if } Y_j = Y_k \\ -1 & \text{if } Y_j < Y_k \end{cases} \quad k = 1, 2, \dots, n-1; j = k+1, k+2, \dots, n \quad (8)$$

$$Z^* = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}^*(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}^*(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: n 为序列长度; $T_i = \frac{Y_i - Y_k}{j - k}$; $m = \frac{n(n-1)}{2}$, $i = 1, 2, \dots, \frac{n(n-1)}{2}$; $k = 1, 2, \dots, n-1$; $j = k+1, k+2, \dots, n$; y 为序列 $\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 的均值; n_p 为序列数据组的数目; m_p 为第 p 个数据组中数据点的数目。

1.3.3 径流演变的周期性分析

小波变换^[18-19]能够有效地识别、判断和提取水文时序中的周期成分,是序列时频分析的一种重要手段,其主要计算步骤为: (1) 将流域径流序列进行距平处理; (2) 将距平后的序列和 Morlet 小波函数代入公式(10),取不同的 a 和 b , 计算小波变换系数 $w_f(a, b)$, 绘制以年份 b 为横坐标,不同时间尺度 a 为纵坐标的二维小波变换系数等值线图; (3) 根据公式(11)由小波变换系数计算出小波方差 Var , 并绘制出小波方差图,找出极大值点对应的的时间尺度 a , 即为其周期 T 。

$$w_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \Delta t \sum_{i=1}^n f(i \cdot \Delta t) \Psi \left(\frac{i \cdot \Delta t - b}{a} \right) \quad (10)$$

$$\text{Var}(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |w_f(a, b)|^2 db \quad (11)$$

式中: a 为尺度参数; b 为平移参数; n 为数据个数; $i = 1, 2, \dots, n$; Δt 为采样时间间隔; $\Psi(x)$ 是小波函数 $\Psi(x)$ 的复共轭函数。

1.3.4 径流的时序演变模拟

(1) 径流模拟的影响因子筛选。

这里采用统计相关检验法从气候和人类活动多种因素中筛选模型模拟输入因子,主要步骤为:(a)利用公式(12)计算径流与影响因素的互相关系数 $r_k(x, y)$; (b)以公式(13)计算 $\alpha=0.05$ 下径流与影响要素之间相关系数的最低值; (c)当相关系数 $r_k(x, y) < |r_{0k}|_{\min}$ 时,可接受径流与该影响因素序列为独立的这一假设,排除该因素为影响径流的主导因素;而当 $r_k(x, y) > |r_{0k}|_{\min}$ 时,径流与该影响因素为相关序列的假设。

$$r_k(x, y) = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(y_{t+k} - \bar{y})}{\left(\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2 (y_t - \bar{y})^2 \right)^{1/2}} \quad (12)$$

式中: x_t 和 y_t 分别为径流和影响要素(气候或人类活动)的时间序列; k 为时移; n 为数据个数; \bar{x} 和 \bar{y} 为样本均值。

$$|r_{0k}|_{\min} = \frac{t_p}{\sqrt{t_p^2 + n - 2}} \quad (13)$$

式中: $|r_{0k}|_{\min}$ 为径流与影响要素之间相关系数的最低值; p 为显著性水平; t_p 为分布双侧检验的临界值; n 为数据个数。

(2) 径流的时序演变模拟模型。

人工神经网络模型具有自我学习、自我适应能力,尤其对于尚不能用确切函数表示的问题,模型具有较好识别、仿真能力。BP神经网络模型解决了多层前馈网络的学习问题,在各学科各个方面获得了广泛的应用, BP神经网络算法的建模过程及各参数的确定原则详见参考文献[4]。这里用来模拟巴拉格尔河流域水文年、水文季尺度径流量时序演变的神经网络模型拓扑结构见图2。

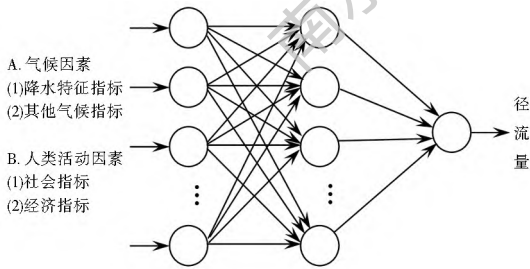


图2 径流演变时序模拟的神经网络拓扑结构
Fig.2 The topological diagram of neural network for simulation of runoff evolution

2 结果与讨论

2.1 突变特征

通过巴拉格尔河流域降水-径流双累积曲线可以初步判断径流序列突变拐点为1998年(图3),但由于径流量与降水量的变化规律不一致,导致突变拐

点不显著,还需通过径流、降水累积距平分析来进一步确定突变拐点。巴拉格尔河流域径流突变点为1965年、1985年和1998年(图4),结合降水-径流双累积曲线进一步确定径流序列最显著的突变拐点为1998年。在1998年之前反映了巴拉格河流域径流变化主要受到降水变化的影响,而在1998年之后,人类活动的影响逐渐显现,径流量的变化除了受到降水等自然因素的影响外,还叠加了人类活动的影响(图3)。

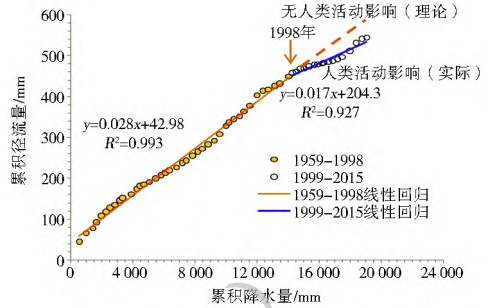


图3 研究区流域径流量和降水量双累积曲线
Fig.3 The double mass curve of runoff and precipitation in the study area

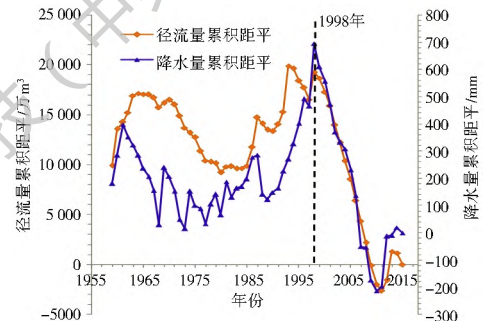


图4 研究区径流、降水累积距平变化曲线
Fig.4 The cumulative anomaly variation of runoff and precipitation in the study area

2.2 趋势变化特征

由改进Mann-Kendall检验可知,在 $\alpha=0.05$ 显著性水平下,年径流量($p=0.042$)及枯水季径流量($p=0.003$)下降趋势显著,而丰水季径流量($p=0.117$)呈不显著的下降趋势(表1)。无论时间尺度如何,巴拉格尔河流域径流总体呈现下降趋势。

表1 年季尺度径流趋势的改进Mann-Kendall检验结果
Tab.1 The trend results of runoff and precipitation coefficient at an annual and seasonal scale from the modified Mann-Kendall test

时间尺度	Sen斜率	S	Z*	趋势	p
水文年	-40.379	-498	-2.030	↓	0.042*
丰水季	-18.448	-379	-1.569	↓	0.117
枯水季	-20.591	-560	-3.012	↓	0.003*

注:* 为在显著性水平 $\alpha=0.05$ 下趋势显著;↓为下降趋势。

2.3 周期变化特征

对巴拉格尔河流域水文年、季径流序列进行小

波变换分析,流域年径流存在两个明显的特征时间尺度,分别为 3~9 a、24~33 a,并且小波方差存在两个较为明显的峰值(图 5(a)),表明其对应的 6 a 和 30 a 为年径流序列的周期,其中 30 a 尺度变化周期方差贡献最大,表明流域径流存在 30 a 的显著周期,频率方差在 6 a 尺度存在一个不太明显的波峰,表明序列在 6 a 左右存在不显著周期;丰水季径流序列没有显著的频率方差极值,说明流域丰水季

径流在分析序列中不存在显著周期,但从方差曲线的上升趋势来看,丰水季径流应遵循一个更大的周期变化,这决定着流域丰水季径流在整个研究时间域内的变化特性(图 5(b));类似于年尺度,流域枯水季径流序列存在 6 a、30 a 时间尺度的周期(图 5(c)),这些周期的波动表明巴拉格河河流域枯水季径流在时间域的变化决定着整个年径流的变化特性。

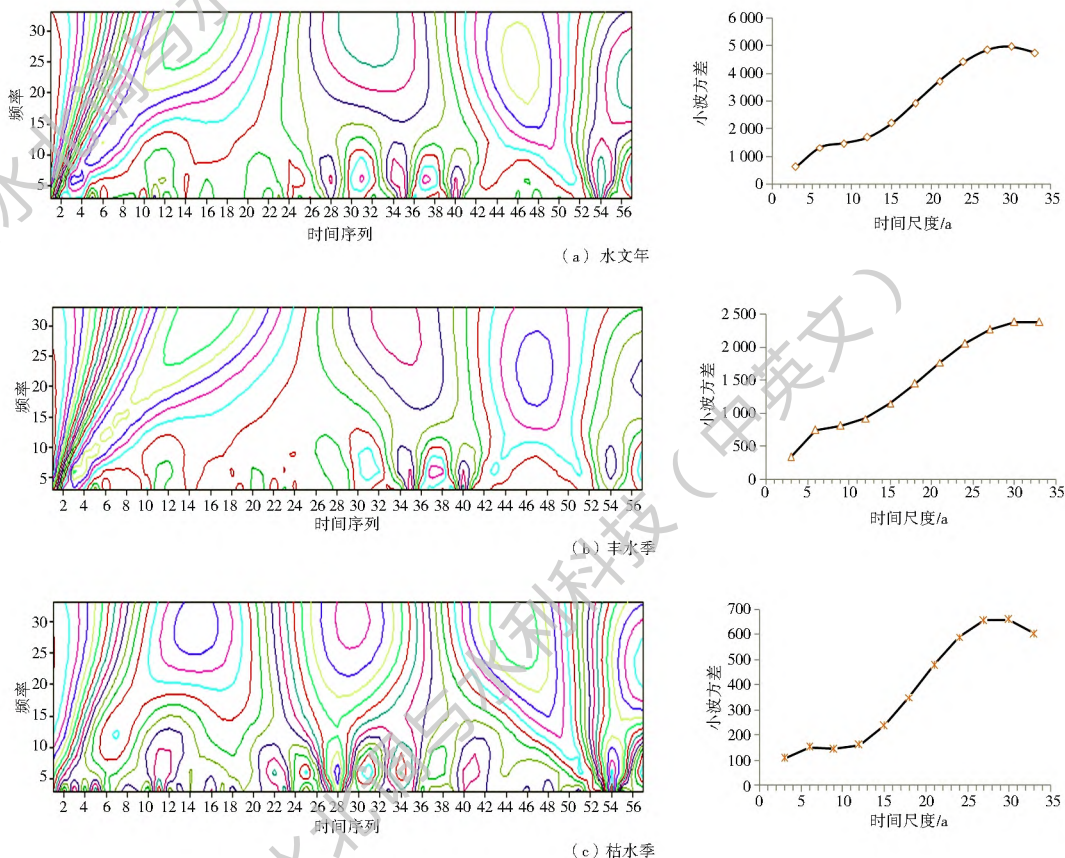


图 5 水文年、季尺度径流量序列的小波变换系数图及方差图

Fig. 5 Wavelet transform coefficients and wavelet variance map of runoff at annual and seasonal scale

2.4 时序演变模拟

2.4.1 径流与环境因素关系的统计检验

流域径流受到气候、流域特征和人类活动等因素的影响,这里计算气候因素(降水特征指标和其他气象指标)和人类活动因素与研究区径流量的相关性,以分析径流变化与影响因素的密切程度。由于降水与径流的关系密切,因此这里特别对降水指标进行细化,对降水量、降水天数、降水次数、最大降水强度、平均降水强度等降水特征指标与径流的相关性进行了分析。

用统计相关检验法分析气象要素、社会经济指标与径流的相关性,以判断变量之间的密切程度,自然对数变换可以增强径流和各影响因素之间的相关性(表 2)。在 95% 的置信水平下,进行双侧 t 检验

($|r_{0k}|_{\min} = 0.36$),流域年径流与气象要素中的降水量、降水天数、降水次数、平均降水强度、相对湿度呈显著正相关,与人类活动因素中的所有经济指标呈显著负相关,这表明降水特征指标及相对湿度越大,巴拉格河流域的径流量越大,而人口数量越多,经济社会发展速度越快,径流量越小;流域丰水季径流与气候因素中所有的降水特征指标、相对湿度以及与所有的人类活动因素呈显著正相关,与气候因素中的日照时间、温度呈显著负相关;对于流域枯水季径流,仅与气候因素中降水天数、降水次数、相对湿度以及所有的人类活动因素呈显著正相关。总体来看,无论水文年,还是丰水季或枯水季径流,除气候变化影响外,人类活动也已成为径流变化的主要驱动因素,主要原因为干旱半干旱高原内陆河流域人口数

量快速增长,人类活动加剧,经济快速发展等一系列因素导致流域用水量猛增,从而使径流量急剧减少。

表2 研究区径流和气候因素、人类活动因素的相关分析

Tab. 2 Correlation analysis of runoff and climate factors and human activities factors in the study area

指标类型	指标	相关系数						
		年径流		丰水季径流		枯水季径流		
		Q	LnQ	Q	LnQ	Q	LnQ	
气候因素	降水量	0.575*	0.600*	0.717*	0.797*	0.133	0.265	
	降水天数	0.504*	0.474*	0.686*	0.737*	0.427*	0.383*	
	降水次数	0.411*	0.436*	0.512*	0.602*	0.447*	0.428*	
	最大降水强度	0.249	0.349	0.364*	0.554*	0.068	0.209	
	平均降水强度	0.406*	0.496*	0.446*	0.535*	-0.068	0.083	
其他气候指标	日照时间	-0.111	-0.049	-0.488*	-0.378*	0.208	0.306	
	相对湿度	0.417*	0.456*	0.658*	0.805*	0.429*	0.375*	
	温度	-0.196	-0.180	-0.573*	-0.713*	-0.371*	-0.244	
	风速	-0.063	-0.121	-0.020	-0.183	0.043	-0.050	
	蒸发	-0.369*	-0.513*	-0.494*	-0.291	-0.086	-0.261	
人类活动因素	社会指标	人口	-0.227	-0.256	-0.159	-0.482*	-0.172	-0.473*
	经济指标	GDP	-0.025	-0.379*	-0.08	-0.552*	0.090	-0.655*
		PIP	-0.109	-0.356	-0.133	-0.424*	-0.036	-0.633*
		SIP	-0.001	-0.378*	-0.061	-0.433*	0.127	-0.552*
		TIP	-0.238	-0.462*	-0.240	-0.482*	-0.184	-0.687*

注: Q 表示实测径流量; LnQ 表示对实测径流取自然对数; * 表示在 95% 置信水平下的序列显著相关; 其它符号同前。

2.4.2 径流时序的演变模拟分析

选择 1986-2010 年的径流实测序列资料进行模型参数识别,以 2011-2015 年的序列资料进行模型的检验。以统计检验(表 2)中与径流显著相关的指标作为神经网络模型模拟输入因子(即输入层节点),水文年尺度选择降水量、降水天数、降水次数、平均降水强度、蒸发量、相对湿度、GDP、PIP、SIP 和 TIP 等 10 个指标,丰水季选择降水量、降水天数、降水次数、最大降水强度、平均降水强度、日照时间、相对湿度、温度、人口、GDP、PIP、SIP 和 TIP 等 13 个指标,枯水季选择降水天数、降水次数、相对湿度、人口、GDP、PIP、SIP 和 TIP 等 8 个指标;隐含层数取 1,隐含层节点数通过试算法确定,分别为 15、18 和 10;输出层节点分别为各时间尺度对应的径流深。水文年、丰水季和枯水季分别经过 6 000、5 000 和 5 500 次学习训练后,神经网络模型实测径流和计算值拟合误差在模型识别和检验阶段均取得较好的效果,网络全局误差依次为 0.01、0.11 和 0.18。

对巴拉格尔河流域年季尺度下的径流量建模样本和检验样本的实际值和模拟值对比(图 6、表 3)可以看出,在模型识别期,枯水季径流量的平均相对误差最小,而丰水季径流量的平均相对误差最大;在模型检验期,枯水季径流量的平均相对误差为 17.09%,

丰水季径流量模拟偏差较大,平均相对误差为 18.73%,而年径流量的模拟效果最好,平均相对误差为 16.23%。在基准期,年径流量的平均相对误差最小,为 1.07%,丰水季径流量、枯水季径流量的平均相对误差分别为 3.03%、2.19%;在变化期,枯水季径流量的平均相对误差最小,为 4.21%,年径流量、丰水季径流量的平均相对误差分别为 16.80%、20.36%。总体而言,无论是模型识别和检验阶段,还是径流基准期和变化期,丰水季径流的模拟偏差均大于其他时间尺度,分析其主要原因可能为,尽管丰水季降水量较多,但蒸散发量也相对较

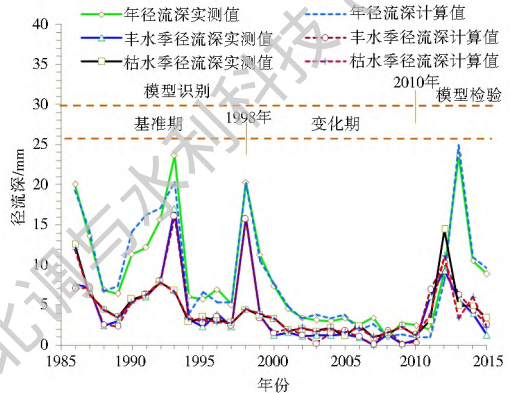


图 6 水文年、季尺度径流量神经网络模型学习模拟结果

Fig. 6 Training results of neural network model for annual and seasonal runoff

大,同时人类活动耗水量大,导致径流量计算值和实测值之间误差较大,而水文年和枯水季的平均相对误差较小,说明在全年和枯水季径流与气候和人类活动变化关系密切,同时也说明了神经网络方法对该流域径流量进行模拟总体适用性较好。

表 3 基于 BP 神经网络模拟流域年、水文季尺度径流量实测值与计算值对比结果

Tab. 3 Comparison of measured and calculated values of runoff at annual and seasonal scale based on BP neural network

计算阶段	平均绝对误差/mm			平均相对误差(%)		
	全年	丰水季	枯水季	全年	丰水季	枯水季
模型识别	0.00	-0.04	-0.05	-12.13	-18.13	-0.19
模型检验	0.10	1.06	-0.85	-16.23	18.73	-17.09
基准期	0.25	-0.11	-0.12	-1.07	-3.03	-2.19
变化期	-0.17	0.28	-0.23	-16.80	-20.36	-4.21

2.5 讨论

研究区的降水-径流关系在 1998 年左右改变,在相同的降水量条件下,基准期产生的径流量比变化期产生的径流量大,流域天然径流特征发生改变,这与焦玮等^[22]关于锡林河流域的研究结果基本一致,而与 Wang XiXi^[12]等关于该流域的突变年份(1994 年)划分不一致,究其原因可能是突变点确定方法不同、研究的时间尺度不同、以及研究所采用的时间序列长短不一致导致。

由统计相关检验分析得出降水与径流的关系与刘洪兰等^[21]关于黑河流域的分析结果相近,但其仅对气候因素与径流之间的相关性进行了分析,没有将气候和人类活动要素与径流进行综合分析,并且本次研究在前人研究的基础上,不仅将在水文年、季的多时间尺度下进行了径流分析,还通过各要素的对数变换以增强径流和各影响因素的相关性,使分析结果更精确。

以 BP 神经网络来模拟气候波动和人类活动影响下的流域年、季尺度下的径流量,这与朱颖洁等^[5]关于西江流域降水径流演变分析中采用的方法类似,但本论文对于降水特征因素进行了进一步的指标细化,并预先对于模拟输入因子进行了统计相关检验的筛选,以提高径流序列模拟精度。

巴拉格尔河流域存在多种因素对径流变化产生影响,各种因素之间的相互作用较为复杂,BP 神经网络只是一种人工智能方法,在没有合适的物理机制模型情况下是一种快速解决径流模拟问题的有力手段,其和基于径流机理机制的分布式水文模型(如 SWAT、MIKE SHE 等模型)的耦合方法是今后研究的关键方向^[23]。

3 结论

(1) 巴拉格尔河流域水文年、枯水季径流在 1959-2015 年呈现显著的下降趋势,在 1998 年出现拐点,降水-径流关系发生改变,人类活动进程的加剧改变了天然径流发生的机制和变化规律。

(2) 巴拉格尔河流域水文年径流、枯水季径流存在 6 a 和 30 a 左右的变化周期,丰水季径流在分析序列中不存在显著周期,枯水季径流在研究时间域内的变化决定着整个年径流的变化特性。

(3) 通过以社会经济指标量化人类活动影响和细化降水特征因素,运用统计相关检验法筛选出了变化环境下以人类活动为主的影响径流的主要因素,径流受到它们直接或间接的影响而发生变化。

(4) BP 神经网络模型对于巴拉格尔河流域径流量与气候和人类活动因素之间非线性函数关系模拟效果总体较好,表明在无法实现分布式水文模拟时,可以考虑在该流域应用该方法。

研究成果可以为我国高原内陆河草原流域水资源可持续利用和有效配置提供参考依据,对于认识变化环境下内陆河流域的水文循环过程和演变规律、生态环境保护与管理具有一定的现实意义。

参考文献(References):

- [1] 王亮,高瑞忠,刘玉才,等.气候变化和人类活动对滦河流域内蒙段河川径流的影响分析[J].水文,2014,34(3):70-79. (WANG L,GAO R Z,LIU Y C,et al.Impact of climate change and human activities on runoff in neimeng reach of Luanhe River[J].Journal of China Hydrology,2014,34(3):70-79.(in Chinese))
- [2] 王威娜,高瑞忠,王喜喜,等.锡林河流域径流变化规律及气候波动和人类活动影响的定量分析[J].水土保持研究,2018,25(2):347-353. (WANG W N,GAO R Z,WANG X X,et al.Quantitative analysis of runoff variations as affected by climate variability and human activity in the Xilin River Basin[J].Research of Soil and Water Conservation,2018,25(2):347-353.(in Chinese))
- [3] 刘兆飞,王翊晨,姚治君,等.太湖流域降水、气温与径流变化趋势及周期分析[J].自然资源学报,2011,26(9):1575-1584. (LIU Z F,WANG Y C,YAO Z J,et al.Trend and periodicity of precipitation, air temperature and runoff in the Taihu Lake Basin[J].Journal of Natural Resources,2011,26(9):1575-1584.(in Chinese))
- [4] 张勃,王海青,张华,等.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 B,WANG H Q,ZHANG H,et al.The simulation and prediction of monthly runoff in Yingluoxia based on artificial neural network[J].Journal of Natural Resources,2009,24(12):2169-2177.(in Chinese))

- [5] 朱颖洁, 郭纯青, 黄夏坤, 等. 气候变化和人类活动影响下西江梧州站降水径流演变研究[J]. 水文, 2010, 30(3): 50-55. (ZHU Y J, GUO C Q, HUANG X K, et al. Change of precipitation and runoff at Wuzhou Station on Xijiang River under influence of climate changes and human activities[J]. Journal of China Hydrology, 2010, 30(3): 50-55. (in Chinese))
- [6] 陈锡云, 郭东静, 高晓栋, 等. 泾河水川流域近 50 年径流演变特征及影响因素分析[J]. 地理学报, 2016, 36(1): 114-120. (CHEN X Y, GUO D J, GAO X D, et al. Runoff evolution and its impacting factors in the Heshuichuan Basin of the Jinghe River in the past 50 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 36(1): 114-120. (in Chinese))
- [7] 胡珊珊, 郑红星, 刘昌明, 等. 气候变化和人类活动对白洋淀上游水源区径流的影响[J]. 地理学报, 2012, 67(1): 62-70. (HU S S, ZHENG H X, LIU C M, et al. Assessing the impacts of climate variability and human activities on stream flow in the water source area of Baiyangdian Lake[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(1): 62-70. (in Chinese))
- [8] 左德鹏, 徐宗学, 隋彩虹, 等. 气候变化和人类活动对渭河流域径流的影响[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2013, 49(2-3): 115-123. (ZUO D P, XU Z X, SUI C H, et al. Impact of climate change and human activity on stream flow in the Wei river basin[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2013, 49(2-3): 115-123. (in Chinese))
- [9] 张利平, 于松延, 段尧彬, 等. 气候变化和人类活动对永定河流域径流变化影响定量研究[J]. 气候变化研究进展, 2013, 9(6): 391-397. (ZHANG L P, YU S Y, DUAN Y B, et al. Quantitative assessment of the effects of climate change and human activities on runoff in the Yongding River Basin[J]. Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis, 2013, 9(6): 391-397. (in Chinese))
- [10] 张永勇, 张士锋, 翟晓燕. 气候变化下石羊河流域径流模拟与影响量化[J]. 资源科学, 2013, 35(3): 601-609. (ZHANG Y Y, ZHANG S F, ZHAI X Y, et al. Runoff Simulation on the impact of climate change in the Shiyang River Basin[J]. Resources Science, 2013, 35(3): 601-609. (in Chinese))
- [11] HAMED, K H RAO. A modified Mann Kendall trend test for autocorrelated data[J]. Hydrol, 1998, 204, 182-196.
- [12] WANG X X, YANG X M. Trend and extreme occurrence of precipitation in a midlatitude Eurasian steppe watershed at various time scales[J]. Hydrological Processes, 2014, 28(22): 5547-5560.
- [13] 周平, 陈刚, 刘智勇, 等. 东江流域降水与径流演变趋势及周期性特征分析[J]. 生态科学, 2016, 35(2): 44-51. (ZHOU P, CHEN G, LIU Z Y, et al. Variation trend and periodicity analysis of precipitation and runoff in Dongjiang Watershed[J]. Ecological Science, 2016, 35(2): 44-51. (in Chinese))
- [14] 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(22): 1875-1885. (LIU J Y, ZHANG QI, CHEN X, et al. Quantitative evaluations of human and climate induced impacts on hydrological processes of China[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(22): 1875-1885. (in Chinese))
- [15] 李雪, 李运刚, 何娇楠, 等. 1956-2013 年元江-红河流域径流变化及其影响因素分析[J]. 资源科学, 2016, 38(6): 1149-1159. (LI X, LI Y G, HE J N, et al. Analysis of variation in runoff and impacts factors in the Yuanjiang-Red River Basin from 1956 to 2013[J]. Resources Science, 2016, 38(6): 1149-1159. (in Chinese))
- [16] WANG S J, YAN Y X, YAN M, et al. Quantitative estimation of the impact of precipitation and human activities on runoff change of the Huangfuchuan River basin[J]. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22(5): 906-918.
- [17] 王随继, 李玲, 颜明. 气候和人类活动对黄河中游区产流量变化的贡献率[J]. 地理研究, 2013, 32(3): 395-402. (WANG S J, LI L, YAN M. The contributions of climate change and human activities to the runoff yield changes in the middle Yellow River Basin[J]. Geographical Research, 2013, 32(3): 395-402. (in Chinese))
- [18] 周平, 陈刚, 刘智勇, 等. 东江流域降水与径流演变趋势及周期性特征分析[J]. 生态科学, 2016, 35(2): 44-51. (ZHOU P, CHEN G, LIU Z Y, et al. Variation trend and periodicity analysis of precipitation and runoff in Dongjiang Watershed[J]. Ecological Science, 2016, 35(2): 44-51. (in Chinese))
- [19] 刘二佳, 张晓萍, 张建军, 等. 1956—2005 年窟野河径流变化及人类活动对径流的影响分析[J]. 自然资源学报, 2013, 28(7): 1159-1168. (LIU E J, ZHANG X P, ZHANG J J, et al. Variation of Annual Streamflow and the Effect of Human Activity in the Kuye River during 1956 to 2005[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(7): 1159-1168. (in Chinese))
- [20] 赵煜飞, 朱江, 许艳. 近 50a 中国降水格点数据集的建立及质量评估[J]. 气象科学, 2014, 34(4): 414-420. (ZHAO Y F, ZHU J, XU Y. Establishment and assessment of the grid precipitation datasets in China for recent 50 year[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2014, 34(4): 414-420. (in Chinese))
- [21] 刘洪兰, 张强, 郭俊琴, 等. 黑河流域春季降水空间分异性特征及其与黑河流量的相关分析[J]. 中国沙漠, 2014, 34(6): 1633-1640. (LIU H L, ZHANG Q, GUO J Q, et al. Spatial differentiation of spring precipitation in the Heihe river basin and its correlation with the river flow[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(6): 1633-1640. (in Chinese))
- [22] 焦玮, 朱仲元, 宋小园, 等. 近 50 年气候和人类活动对锡林河流域径流的影响[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(6): 904-909. (JIAO W, ZHU Z Y, SONG X Y, et al. Impacts of climate change and human activities on runoff yield of the Xilin River Basin over nearly 50 years[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(6): 904-909. (in Chinese))
- [23] 苏安玉, 李衡, 濮励杰, 等. 基于 RAGA-BP 神经网络模型的三江平原地下水资源预测研究[J]. 地理科学, 2013, 9(6): 391-397. (SU A Y, LI H, PU L J, et al. Evaluation of groundwater resources based on RAGA-BP neural networks in the Sarjiang Plain[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 9(6): 391-397. (in Chinese))