

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.01.016

长江上游径流对气象要素变化的敏感性分析

沈嘉聚^{1,2,3}, 杨汉波^{2,3}, 刘志武¹, 杨大文^{2,3}

(1. 中国长江三峡集团有限公司科学技术研究院, 北京 100038; 2. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084;
3. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要:选取长江上游 8 个主要水文站(直门达、石鼓、屏山、高场、北碚、寸滩、武隆、宜昌)控制流域作为子流域,利用其 1979—2015 年径流及气象数据,采用机器学习方法计算径流对降水与气温变化的敏感性,并与多元线性回归法和 Budyko 框架法进行对比,分析降水与气温变化对径流变化的贡献。结果表明:1979—2015 年 8 个子流域径流与降水变化趋势整体不显著($p=0.01$),气温呈显著上升趋势($p<0.01$);径流对降水、气温的敏感性系数均值范围分别为 0.37~0.76 mm/mm、-4.77~-33.53 mm/°C;径流对降水、气温的敏感性系数随着干旱指数的增大而减小;在干旱指数大的子流域降水变化对径流变化的影响更大,在干旱指数小的子流域气温变化对径流变化的影响更大。

关键词:径流变化;降水;气温;敏感性系数;机器学习;Budyko 框架;长江上游

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)01-0119-08

Sensitivity analysis of annual runoff to annual variation of meteorological elements in upper reaches of the Yangtze River//SHEN Jiaju^{1,2,3}, YANG Hanbo^{2,3}, LIU Zhiwu¹, YANG Dawen^{2,3} (1. Academy of Science and Technology, China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China; 2. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The control basins of 8 major hydrologic stations (Zhimenda, Shigu, Pingshan, Gaochang, Beibei, Cuntan, Wulong, Yichang) in the upper reaches of the Yangtze River are selected as sub basins. Using their runoff and meteorological data from 1979 to 2015, the machine learning method was used to calculate the sensitivity of runoff to changes in precipitation and temperature, compared with the multiple linear regression method and the Budyko framework method, and further analyzed the contribution of precipitation and temperature changes to runoff changes. The results showed that the change trends of runoff and precipitation were not significant ($p=0.01$), and the temperature showed a significant upward trend ($p<0.01$) from 1979 to 2015. The average range of sensitivity coefficients of runoff to precipitation and temperature was 0.37~0.76 mm/mm and -4.77~-33.53 mm/°C, respectively. The sensitivity coefficient of runoff to precipitation and temperature decreases with the increase of drought index. The impact of precipitation change on runoff change is greater in the sub basin with large drought index, and the impact of temperature change on runoff change is greater in the sub basin with small drought index.

Key words: runoff change; precipitation; temperature; sensitivity coefficient; machine learning; Budyko framework; upper reaches of the Yangtze River

由于气候变化、社会经济发展以及长江上游水资源开发利用的影响,近年来长江上游径流发生了较大变化^[1-5]。开展长江上游径流对气候变化的响应研究可以为长江上游水电开发、梯级水库优化调

度运行提供依据,对流域水资源规划、开发利用与保护具有重要意义。目前,径流变化的分析方法可归纳为 3 类:水文模型情景模拟法^[6-10]、统计模型相关分析方法^[11-14]和基于 Budyko 框架的弹性系数

基金项目:国家重点研发计划(2021YFC3000202);中国长江三峡集团有限公司科研项目(202003098);国家自然科学基金重大项目(41890821);水沙科学与水利水电工程国家重点实验室自主课题(2021-KY-04)

作者简介:沈嘉聚(1996—),男,博士研究生,主要从事气候变化下水文响应研究。E-mail:shenjij19@mails.tsinghua.edu.cn

通信作者:杨汉波(1979—),男,副教授,博士,主要从事气候变化下的水文响应与生态水文研究。E-mail:yanghanbo@tsinghua.edu.cn

法^[15-17]。水文模型情景模拟法采用的模型通常具有良好的物理基础,但模型结构与模型参数存在一定的不确定性,且对输入数据要求较高^[18-20];统计模型运算简单,但自变量之间的相关性往往会影响归因结果;基于 Budyko 框架的弹性系数法,因其物理意义清楚、所需资料易于获得而被广泛应用,但长时间序列中的噪声通常会对归因结果产生影响^[21-22],因此在归因分析时通常采用多种分析方法进行对比验证^[7]。根据水文模型情景模拟法中采用模型的建模原理可以分为过程驱动模型和数据驱动模型,过程驱动模型在不同区域参数需要分别率定,可能产生较大不确定性,且应用较为复杂;随着数据科学与高性能计算的快速发展,基于机器学习方法的数据驱动模型能快速从大量数据中训练学习得到有效信息,并用于未来变化情景的预测,因而受到广泛关注^[23]。BP 神经网络是机器学习中较为成熟的一种算法,通过反向传播算法训练由输入层、输出层及若干隐藏层的节点相互连接而成的多层前馈网络,具有很强的非线性映射能力,但其初始权值与阈值为随机选取,容易在网络训练过程中陷入局部最小值^[24];而遗传算法则是模仿生物演替过程中的选择、交叉、变异和优胜劣汰的筛选过程,具有很好的全局搜索性,能够为神经网络中不确定的初始权值与阈值寻找全局最优解^[25],从而提高模型准确性。

在全球变暖的大背景下,气候变化对长江上游径流产生了重要影响^[26]。以往对于长江上游气象要素对径流影响的研究主要通过统计方法^[13-14,26-27]进行定性分析,以及利用传统水文模型情景模拟法^[7-8,10]进行定量归因,而运用机器学习算法通过情景模拟进行敏感性分析的研究较少。因此,本文运用遗传算法优化的 BP 神经网络(genetic algorithm optimize BP neural network, GA-BP)算法替代传统水文模型,分析长江上游径流对降水与气温变化的敏感性,并与多元线性回归法及基于 Budyko 框架法的结果进行对比,探究近年来长江上游年径流量变化趋势及其气象驱动因子。

1 研究区概况与研究数据

1.1 研究区概况

长江上游是指宜昌水文站控制的流域,包括金沙江、岷江、乌江、嘉陵江等水系的流域区域(图 1),流域面积约 100 万 km²。长江上游区域地形复杂,包括青藏高原、四川盆地,涉及青海、云南、甘肃、四川、贵州等多个省份,气候受青藏高原、东南季风以及西南季风的综合影响,区域内空间差异较大。长

江上游年均气温 10 ~ 15℃,呈自西向东递增的分布规律;年平均降水量 800 ~ 1 200 mm,呈自西北向东南递增的分布规律。除源区、高山区域多降雪,长江上游径流以降水补给为主,径流主要集中在夏季,雨热同期,洪水具有洪峰高、洪量大、持续时间长等特点。

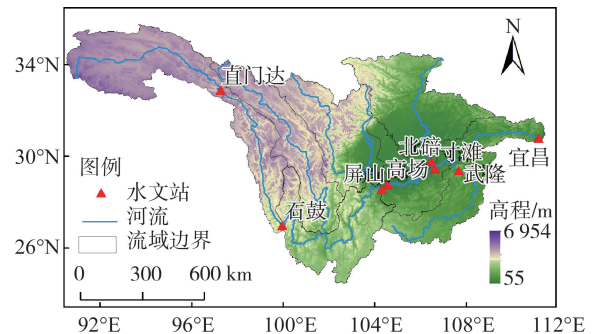


图 1 研究区域及水文站点分布

Fig. 1 Study area and distribution of hydrological stations

1.2 研究数据

收集了长江上游 8 个水文站(直门达、石鼓、屏山、高场、北碚、武隆、寸滩和宜昌)1979—2015 年逐日径流数据。同时期的气象数据来源于国家青藏高原科学数据中心(National Tibetan Plateau Third Pole Environment Data Center, TPDC)的中国区域地面气象要素驱动数据集(China Meteorological Forcing Dataset, CMFD)^[28-29],包括近地面气温、地面向下短波辐射与降水强度,时间分辨率为 1 d,水平空间分辨率为 0.1°。潜在蒸散发量 ET_0 采用国际粮农组织(FAO)推荐的潜在蒸散发计算方法^[30]简化参数推导得到的 Irmak-Allen 公式^[31](式(1))进行估算,该公式在 Penman-Monteith 公式基础上根据美国湿润地区的数据进行线性简化得到^[31],在长江流域有良好的适用性^[32-33]。

$$ET_0 = -0.611 + 0.149 R_s + 0.079T \quad (1)$$

式中: R_s 为太阳辐射量, MJ/m²; T 为日平均气温, °C。

2 研究方法

2.1 GA-BP 算法

GA-BP 算法的具体流程如图 2 所示。神经网络输入变量为当日降水量、前 6 d 降水量和日平均气温,输出变量为日径流量,神经网络由输入层、隐藏层和输出层构成,各层神经元数量分别为 8、16、1。与水文模型情景模拟法类似,前 80% 的数据为训练集,剩余 20% 数据为测试集。采用纳什效率系数(NSE)、相关系数(R^2)和均方根误差(RMSE)评估 GA-BP 算法的模拟效果。计算径流对气象要素

变化敏感性时,对测试集输入变量施加一微小变化量,考虑实际降水与气温的变化,取该气象要素的3%进行扰动,得到新的输出。敏感性系数为输出变量的变化量与输入变量的变化量的比值。

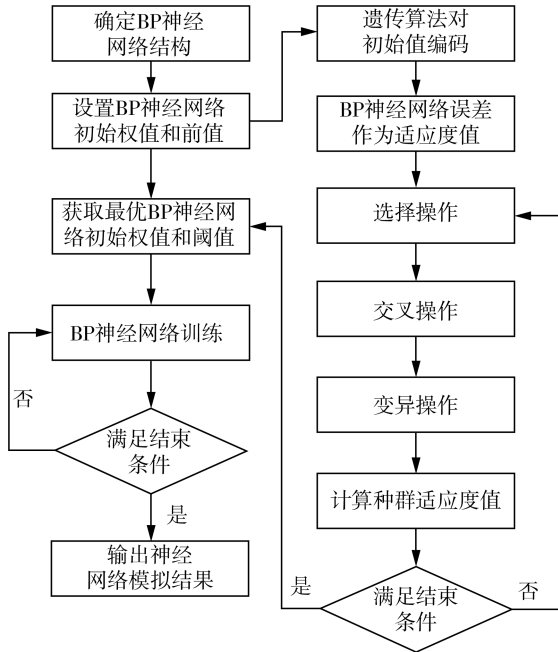


图2 GA-BP 算法流程

Fig.2 GA-BP algorithm flowchart

2.2 多元线性回归法

趋势分析采用多元线性回归法,显著性水平 p 取 0.01,该方法通过多个自变量进行线性组合共同预估因变量。假设年径流 R 与年降水 P 、年气温 T_y 之间存在线性相关关系:

$$R = \beta_0 + \beta_P P + \beta_T T_y + \varepsilon \quad (2)$$

式中: β_0 为回归常数; β_P 、 β_T 分别为径流对降水和气温变化的敏感性系数; ε 为回归残差。

2.3 Budyko 框架法

Budyko 框架法假设流域实际蒸散发量可以表

示为流域降水量和潜在蒸散发量的函数^[34],据此 Choudhury 等^[35-36]提出了 Choudhury-Yang 公式:

$$ET = \frac{P \cdot ET_0}{(P^n + ET_0^n)^{\frac{1}{n}}} \quad (3)$$

式中: ET 为实际蒸散发量, mm/a; n 为下垫面参数,综合反映了地形、土壤、植被等因素影响。结合多年流域水量平衡方程:

$$R = P - ET \quad (4)$$

n 可根据 R 、 P 、 ET_0 的多年平均值反算求得,并假定在研究期间不变。将年径流量 R 的变化趋势表示为全微分形式:

$$\frac{dR}{dt} = \frac{\partial R}{\partial P} \frac{dP}{dt} + \frac{\partial R}{\partial T} \frac{dT}{dt} + \frac{\partial R}{\partial R_s} \frac{dR_s}{dt} \quad (5)$$

式中: $\frac{dX}{dt}$ 为变量 X 的变化趋势; $\frac{\partial R}{\partial X}$ 为年径流量 R 对变量 X 的敏感性系数。

3 结果与分析

3.1 径流、降水及气温的变化趋势

表 1 为长江上游各水文站 1979—2015 年径流、降水量及气温的变化趋势。可见,径流增加趋势最大的为直门达站,达 0.69 mm/a;减少趋势最大的为高场站,为 2.81 mm/a。沿长江干流从上向下,径流变化由直门达站、石鼓站、屏山站的增加趋势,逐渐转变为高场站、北碚站、寸滩站、武隆站和宜昌站的下降趋势;值得注意的是,在 $p = 0.01$ 的显著性下,除高场站外其余站点变化趋势均不显著。降水量方面,直门达站和石鼓站控制流域显著增加 ($p < 0.01$),分别为 4.28 mm/a 和 3.13 mm/a;屏山、寸滩和宜昌站点控制流域呈不显著增加,其余站点控制流域呈不显著减少。气温方面,各站点控制流域内气温均呈现显著上升趋势 ($p < 0.01$),变化范围从

表 1 长江上游各水文站控制流域 1979—2015 年径流、降水及气温的变化趋势

Table 1 Trends in runoff, precipitation and air temperature at hydrological stations in upper reaches of the Yangtze River from 1979 to 2015

水文站	控制流域	控制流域面积/ km^2	径流		降水		气温	
			多年均值/ mm	变化趋势/ $(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	多年均值/ mm	变化趋势/ $(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	多年均值/ $^{\circ}\text{C}$	变化趋势/ $(^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1})$
直门达	长江干流	13.95	98.46	0.69	390.32	4.28*	-4.90	0.062*
石鼓	长江干流	21.48	198.83	0.20	457.61	3.13*	-2.75	0.060*
屏山	长江干流	45.59	316.25	0.28	644.87	1.26	2.49	0.053*
高场	岷江	13.47	613.72	-2.81*	945.31	-1.01	5.00	0.034*
北碚	嘉陵江	15.72	406.99	-2.19	886.55	-0.27	12.06	0.043*
寸滩	长江干流	83.84	401.76	-0.79	757.77	0.40	5.73	0.047*
武隆	乌江	8.07	583.99	-2.32	1127.57	-0.64	13.98	0.021*
宜昌	长江干流	97.71	432.68	-1.38	815.63	0.20	6.92	0.045*

注: * 表示趋势通过 $p = 0.01$ 的显著性检验。

武隆站的 $0.021^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 到直门达站的 $0.062^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 。

3.2 GA-BP 算法径流模拟

表 2 为 GA-BP 算法径流模拟结果。8 个水文站训练集的 NSE 均值为 0.71, R^2 均值为 0.71, RMSE 均值为 $0.59 \text{ mm}/\text{d}$; 测试集 NSE 均值为 0.61, R^2 均值为 0.64, RMSE 均值为 $0.55 \text{ mm}/\text{d}$, 整体模拟效果良好。直门达站、石鼓站以及宜昌站模拟效果最好, 训练集 NSE 值均高于 0.7, 测试集 NSE 值均高于 0.6; 北碚站和武隆站的模拟效果相对较差, 主要是因为日径流数据波动较大, GA-BP 算法对洪峰模拟效果较差, 从而拉低整体模拟效果。

表 2 GA-BP 算法径流模拟结果

Table 2 Results of GA-BP algorithm runoff simulation

水文站	训练集			测试集		
	NSE	R^2	RMSE/ ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)	NSE	R^2	RMSE/ ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)
直门达	0.73	0.72	0.16	0.64	0.65	0.17
石鼓	0.77	0.77	0.22	0.66	0.68	0.25
屏山	0.71	0.72	0.34	0.53	0.55	0.39
高场	0.65	0.65	0.90	0.59	0.62	0.76
北碚	0.63	0.63	1.32	0.54	0.59	1.17
寸滩	0.75	0.75	0.47	0.68	0.71	0.46
武隆	0.64	0.64	0.89	0.55	0.62	0.74
宜昌	0.78	0.78	0.38	0.69	0.71	0.43

3.3 径流对气象要素变化的敏感性

表 3 为 3 种方法得到的长江上游各水文站径流对降水、气温变化的敏感性系数。对于径流对降水的敏感性, 多元线性回归法得到的各站点敏感性系数均值为 $0.65 \text{ mm}/\text{mm}$, GA-BP 算法和 Budyko 框架法得到的结果分别为 $0.52 \text{ mm}/\text{mm}$ 和 $0.72 \text{ mm}/\text{mm}$; 对于径流对气温的敏感性, 多元线性回归法、GA-BP 算法以及 Budyko 框架法的各站点敏感性系数均值

表 3 长江上游各水文站径流对降水和气温的敏感性系数

Table 3 Sensitivity coefficient of runoff of hydrological stations in upper reaches of the Yangtze River to precipitation and temperature

水文站	降水敏感性系数/ ($\text{mm} \cdot \text{mm}^{-1}$)			气温敏感性系数/ ($\text{mm} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)		
	多元线性 回归法	GA-BP 算法	Budyko 框架法	多元线性 回归法	GA-BP 算法	Budyko 框架法
直门达	0.26	0.36	0.49	0.38	-3.73	-10.95
石鼓	0.38	0.22	0.66	-9.14	-0.10	-11.8
屏山	0.53	0.60	0.72	-10.71	-10.95	-14.89
高场	0.88	0.55	0.84	-44.49	-36.97	-19.14
北碚	0.89	0.45	0.74	-31.68	-24.38	-25.92
寸滩	0.70	0.66	0.76	-22.10	-8.73	-17.64
武隆	0.77	0.63	0.81	-20.10	-35.76	-33.12
宜昌	0.78	0.69	0.76	-29.66	-23.36	-18.25
平均	0.65	0.52	0.72	-20.94	-17.99	-18.96

分别为 $-20.94 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$ 、 $-17.99 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$ 和 $-18.96 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$ 。3 种方法计算径流对降水的敏感性均值最小的是直门达站, 为 $0.37 \text{ mm}/\text{mm}$, 最大的是高场站, 为 $0.76 \text{ mm}/\text{mm}$; 对气温的敏感性均值最小的时直门达站, 为 $-4.77 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$, 最大的是高场站, 为 $-33.53 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$ 。沿长江干流从上向下, 各水文站径流对降水的敏感性总体呈现增加趋势, 即下游区域径流对降水的变化更为敏感, 径流对气温的敏感性同样呈现增加趋势。

3.4 气象要素对径流变化的贡献量

表 4 为长江上游各水文站降水和气温对径流变化的贡献量, 可见, 多元线性回归法、GA-BP 算法和 Budyko 框架法得到的降水导致径流变化的范围分别为 $-0.89 \sim 1.19 \text{ mm}/\text{a}$ 、 $-0.55 \sim 1.54 \text{ mm}/\text{a}$ 和 $-0.85 \sim 2.10 \text{ mm}/\text{a}$; 气温导致径流变化的范围分别为 $-1.51 \sim 0.02 \text{ mm}/\text{a}$ 、 $-1.26 \sim -0.01 \text{ mm}/\text{a}$ 和 $-1.11 \sim -0.65 \text{ mm}/\text{a}$ 。与多元线性回归法相比, GA-BP 算法得到的降水和气温变化导致径流的变化, 在径流增加的石门达站和石鼓站结果偏大, 在径流减少的高场站、北碚站、寸滩站、武隆站和宜昌站结果偏小。3 种方法得到的降水对径流变化的贡献量均值的绝对值最小的是宜昌站, 为 $0.15 \text{ mm}/\text{a}$, 最大的是直门达站, 为 $1.58 \text{ mm}/\text{a}$; 气温对径流变化的贡献量均值的绝对值最小的直门达站, 为 $-0.30 \text{ mm}/\text{a}$, 最大的时北碚站, 为 $-1.17 \text{ mm}/\text{a}$ 。沿长江干流从上到下各水文站降水对径流变化的贡献量整体上呈现减少趋势, 气温对径流变化的贡献量呈现增加趋势。对于降水和气温对径流变化的贡献量, 定义绝对值大者为主导因素。可以发现, 直门达站、石鼓站、屏山站降水对径流变化的贡献量大于气温对径流变化的贡献量, 而高场站、北碚站、寸滩站、武隆站以及宜昌站气温对径流

表 4 长江上游各水文站降水和气温对径流变化的贡献量

Table 4 Contribution of precipitation and temperature at hydrologic stations in upper reaches of the Yangtze River to runoff change

水文站	降水贡献量/ ($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)			气温贡献量/ ($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)		
	多元线性 回归法	GA-BP 算法	Budyko 框架法	多元线性 回归法	GA-BP 算法	Budyko 框架法
直门达	1.11	1.54	2.1	0.02	-0.23	-0.68
石鼓	1.19	0.69	2.07	-0.55	-0.01	-0.71
屏山	0.67	0.76	0.91	-0.57	-0.58	-0.79
高场	-0.89	-0.55	-0.85	-1.51	-1.26	-0.65
北碚	-0.24	-0.12	-0.2	-1.36	-1.05	-1.11
寸滩	0.28	0.27	0.3	-1.04	-0.41	-0.83
武隆	-0.49	-0.41	-0.52	-0.42	-0.75	-0.7
宜昌	0.16	0.14	0.15	-1.33	-1.05	-0.82
平均	0.22	0.29	0.49	-0.85	-0.67	-0.79

变化的贡献量逐渐超过降水的贡献量,成为径流变化趋势的主导因素。

4 讨论

4.1 GA-BP 算法的敏感性

采用 GA-BP 算法进行径流对气象要素变化的敏感性分析时,输入变量的微小扰动都会影响敏感性系数的计算结果。为探究 GA-BP 算法计算径流对气象要素变化的敏感性结果的稳定性,降水扰动分别取测试集降水量均值的 1%、2%、3%、5% 和 10%,气温扰动分别取测试集气温均值的 1%、2%、3%、5% 和 10%,计算不同扰动得到的径流对气象要素变化的敏感性,结果见表 5。可以看出,随着扰动程度的增加,GA-BP 算法得到的径流对降水与气温的敏感性系数逐渐变小,且变化幅度同样变小并趋于稳定。考虑到采用较小扰动时计算误差对于敏感性结果影响较大,并且气象要素在 1979—2015 年的实际变化程度平均约 3%,而且扰动在 3% 时其机器学习敏感性结果的波动幅度较小且趋于稳定,因此在利用 GA-BP 算法计算敏感性时,选择 3% 的扰动进行分析。

表 5 不同程度扰动 GA-BP 算法敏感性计算结果

Table 5 Sensitivity calculation results of GA-BP algorithm with different disturbances

水文站	径流对降水的敏感性系数/(mm·mm ⁻¹)				
	1%	2%	3%	5%	10%
直门达站	0.42	0.39	0.36	0.35	0.34
石鼓站	0.45	0.24	0.22	0.20	0.19
屏山站	0.65	0.61	0.60	0.55	0.49
高场站	0.72	0.66	0.55	0.52	0.51
北碚站	0.51	0.49	0.45	0.43	0.42
寸滩站	0.71	0.69	0.66	0.63	0.60
武隆站	0.69	0.65	0.63	0.61	0.6
宜昌站	0.75	0.71	0.69	0.62	0.60
均值	0.61	0.56	0.52	0.49	0.47

水文站	径流对气温的敏感性系数/(mm·℃ ⁻¹)				
	1%	2%	3%	5%	10%
直门达站	-4.68	-4.36	-3.73	-3.08	-2.80
石鼓站	-1.95	-1.60	-0.10	-0.08	-0.08
屏山站	-12.30	-11.12	-10.95	-8.00	-7.39
高场站	-48.92	-40.51	-36.97	-33.75	-32.82
北碚站	-28.69	-25.55	-24.38	-23.36	-22.63
寸滩站	-10.06	-9.53	-8.73	-7.47	-7.26
武隆站	-44.08	-39.19	-35.76	-32.49	-30.15
宜昌站	-30.02	-28.68	-23.36	-19.61	-16.87
均值	-22.59	-20.07	-17.99	-15.98	-15.00

为研究 GA-BP 算法利用不同时间尺度数据进行敏感性分析的适用性,分别采用日尺度和月尺度数据进行计算,结果见表 6。可见,日尺度与月尺度计算结果中个别站点有所差异,但总体相差不大,计

算结果稳定,所有站点的敏感性系数均值近乎相等。这意味着 GA-BP 算法不仅可以利用日尺度数据计算径流对降水与气温变化的敏感性,也可利用月尺度数据进行计算,从而可以在缺少日数据的流域进行应用。

表 6 不同时间尺度数据 GA-BP 算法敏感性计算结果

Table 6 Sensitivity calculation results of GA-BP algorithm using data of different time scales

水文站	径流对降水的敏感性系数/(mm·mm ⁻¹)		径流对气温的敏感性系数/(mm·℃ ⁻¹)	
	日尺度	月尺度	日尺度	月尺度
直门达	0.36	0.28	-3.73	-4.87
石鼓	0.22	0.33	-0.10	-1.78
屏山	0.60	0.62	-10.95	-8.65
高场	0.55	0.48	-36.97	-26.15
北碚	0.45	0.45	-24.38	-20.19
寸滩	0.66	0.55	-8.73	-10.02
武隆	0.63	0.60	-35.76	-29.39
宜昌	0.69	0.61	-23.36	-24.45
均值	0.52	0.49	-17.99	-15.69

4.2 长江上游径流敏感性与干旱指数的关系

沿长江干流从上向下,各水文站径流对降水与气温的敏感性总体呈增加趋势,高场站径流对气温的敏感性偏高,以下进一步探究这种分布形成的原因。直门达站、石鼓站、屏山站、高场站、北碚站、寸滩站、武隆站、宜昌站的干旱指数 (ET_0/P) 分别为 1.75、1.60、1.28、0.82、0.92、1.08、0.73 和 1.00,可见,高场站控制的流域干旱指数明显低于除武隆外的其他流域。图 3 为长江上游各水文站径流敏感性与干旱指数的关系。如图 3(a) 所示,径流对降水的敏感性与干旱指数间存在很强的线性关系,敏感性系数随着干旱指数的增大而减小;如图 3(b) 所示,径流对气温的敏感性随着干旱指数的增大而减小。对于气象要素的贡献量,如图 3(c) 所示,降水对径流变化的贡献量与干旱指数之间也存在显著的线性关系,敏感性系数随着干旱指数的增大而增大;如图 3(d) 所示,气温对径流变化的贡献量随着干旱指数的增大而减小。即降水对径流变化的影响在越干旱的区域影响越大,而气温对径流变化的影响在越湿润的区域越大,这与之前研究结果一致^[37]。

4.3 不确定性分析

GA-BP 算法对径流过程模拟效果较好,但对洪峰的模拟效果较差,NSE 指标表现一般。以往研究运用机器学习法对长江上游进行径流模拟时,NSE 值一般为 0.6~0.8,如熊一橙等^[38]利用 LSTM 算法模拟北碚站、高场站径流的 NSE 值分别为 0.77、0.62;Zhu 等^[39]利用 ANN 算法模拟北碚站、高场站日径流 NSE 值为 0.78、0.74;黄钰瀚^[40]利用 VIC 模

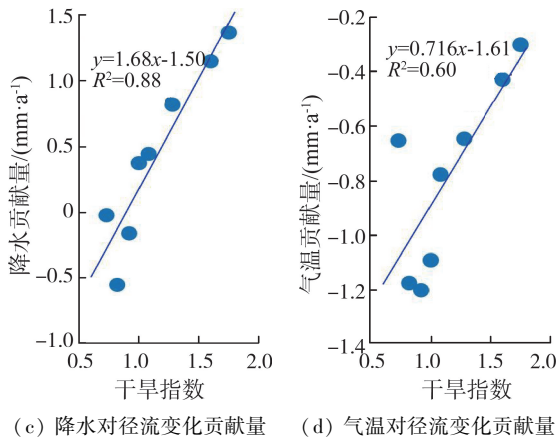
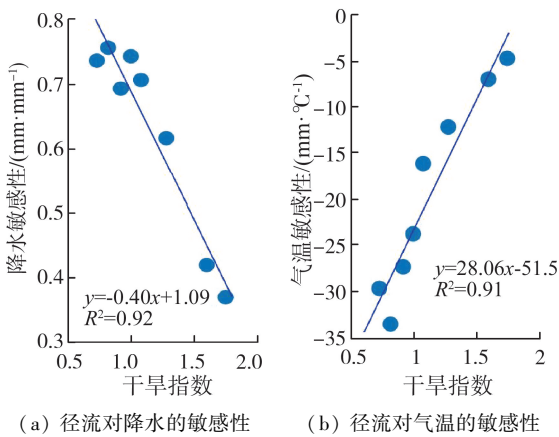


图3 长江上游各水文站径流敏感性与干旱指数的关系

Fig.3 Relationship between runoff sensitivity of hydrologic stations and drought index in upper reaches of the Yangtze River

型对寸滩站日径流进行模拟, NSE 值为 0.80。对比以往研究, 本文 GA-BP 算法对长江上游日径流模拟的结果相差不大。除此之外, 在计算年径流量对年降水量与年均气温的敏感性系数时, 日径流或洪峰的模拟效果不佳对于年径流量的计算结果影响不大, 因此可以认为该方法尽管存在一定的不确定性, 但得出的长江上游流域径流变化的敏感性总体是可信的。

Budyko 框架法的不确定性主要来自以下几个方面: 一是计算 ET_0 采用了较为简单的 Irmak-Allen 公式, 该公式只考虑了太阳辐射和气温的影响, 相关参数是根据美国湿润区的数据通过经验关系简化得到, 采用该公式时, 没有根据长江流域实际情况进行参数重新率定, 对结果可能会产生一定的影响; 二是为与多元线性回归法以及 GA-BP 算法结果进行对比, Budyko 框架法进行敏感性计算时, 由于得到的 $\frac{\partial R}{\partial R_s}$ 均小于 $0.03 \text{ mm} \cdot \text{m}^2/\text{MJ}$, R_s 对径流趋势的贡献量均小于 0.1 mm/a , 因此忽略了向下短波辐射的影响, 这可能会带来一定的误差。

本文计算得到的降水与气温对径流变化的贡献量, 与实测值之间可能存在一定差异。导致这一差异的可能原因是只考虑了降水与气温对径流变化的影响, 对其他气象要素、下垫面植被的变化以及人类活动的影响并未加以考虑。从结果来看, 径流增加的直门达站和石鼓站, 实测的增加值小于估计值; 径流减少的高场站、北碚站、寸滩站、武隆站和宜昌站, 实测的减少值大于估计值, 可能原因是人类活动及植被变化导致耗水的增加、径流减少。

5 结论

a. 基于 GA-BP 算法的敏感性分析, 利用日径流数据得到的结果整体较好, 与多元线性回归法以及 Budyko 框架法的结果总体一致; 对于缺少日径流数据的流域, 该方法也可利用月数据进行计算。

b. 年径流量方面, 高场站显著减少 ($p < 0.01$), 趋势为 -2.81 mm/a , 其余站点无显著变化; 年降水量方面, 直门达站和石鼓站显著增加 ($p < 0.01$), 趋势分别为 4.28 mm/a 和 3.13 mm/a , 其余站点无显著变化; 年气温方面, 各站点均显著上升, 幅度为 $0.021 \sim 0.062 \text{ }^\circ\text{C/a}$ 。

c. 沿长江干流自上而下, 径流变化对降水的敏感性系数由直门达站的 0.37 mm/mm 逐渐增大至宜昌站的 0.74 mm/mm , 最高为高场站的 0.76 mm/mm ; 而径流变化对气温的敏感性也呈现增大趋势, 范围从 $-4.77 \sim -33.53 \text{ mm/}^\circ\text{C}$; 敏感性与干旱指数相关, 随着干旱指数的增加, 径流变化对降水和气温的敏感性减小。

d. 从对径流变化的贡献量来看, 降水的贡献量沿干流自上而下逐渐变小, 气温的贡献量无明显规律。其中直门达站、石鼓站、屏山站径流的变化主要由降水主导; 向下至高场站、北碚站、寸滩站、武隆站、宜昌站, 气温的贡献量超过了降水, 居于主导地位。呈现出随着干旱指数增加降水对径流变化的影响增大、气温对径流变化的影响减小的规律。

参考文献:

- [1] 冯亚文, 任国玉, 刘志雨, 等. 长江上游降水变化及其对径流的影响[J]. 资源科学, 2013, 35(6): 1268-1276. (FENG Yawen, REN Guoyu, LIU Zhiyu, et al. Changes in precipitation in the Upper Yangtze River and its impact on runoff[J]. Resources Science, 2013, 35(6): 1268-1276. (in Chinese))
- [2] 孙甲岚, 雷晓辉, 蒋云钟, 等. 长江流域上游气温、降水及径流变化趋势分析[J]. 水电能源科学, 2012, 30(5): 1-4. (SUN Jialan, LEI Xiaohui, JIANG Yunzhong, et al. Analysis on the trend of temperature, precipitation and

- runoff in the Upper Yangtze River[J]. Water Resources and Power,2012,30(5):1-4. (in Chinese))
- [3] 徐成汉. 长江上游降水径流趋势分析[J]. 安徽水利水电职业技术学院学报, 2018, 18 (1): 1-3. (XU Chenghan. Analysis on the trend of precipitation and runoff in the Upper Yangtze River[J]. Journal of Anhui Technical College of Water Resources and Hydroelectric Power,2018,18(1):1-3. (in Chinese))
- [4] 王文鹏,陈元芳,刘波. 长江上游时空相关气候要素的区域趋势诊断[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45 (1): 14-21. (WANG Wenpeng, CHEN Yuanfang, LIU Bo. Regional climatic trend analysis in upper Yangtze River with consideration of both temporal and spatial correlation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2017,45(1):14-21. (in Chinese))
- [5] 邓鹏,孙善磊,黄鹏年. 气候变化对鄱阳湖流域径流的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020,48(1): 39-45. (DENG Peng, SUN Shanlei, HUANG Pengnian. Influence of climate change on runoff in Poyang Lake Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(1):39-45. (in Chinese))
- [6] ZENG S, XIA J, DU H. Separating the effects of climate change and human activities on runoff over different time scales in the Zhang River Basin [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2014,28 (2):401-413.
- [7] 高冰. 长江流域的陆气耦合模拟及径流变化分析 [D]. 北京:清华大学,2012.
- [8] 黄金龙. 长江寸滩以上流域径流变化研究 [D]. 南京:南京信息工程大学,2014.
- [9] 孟鹏飞. 基于水文模拟定量评估漳河上游流域径流变化归因 [D]. 邯郸:河北工程大学,2020.
- [10] 夏军,王渺林. 长江上游流域径流变化与分布式水文模拟[J]. 资源科学,2008,30(7): 962-967. (XIA Jun, WANG Miaolin. Runoff variation and distributed hydrological simulation in the Upper Yangtze River [J]. Resources Science,2008,30(7):962-967. (in Chinese))
- [11] ZENG X, SCHNIER S, CAI X. A data-driven analysis of frequent patterns and variable importance for streamflow trend attribution[J]. Advances in Water Resources,2020, 147:103799.
- [12] 张菁,张珂,王晟,等. 陕甘宁三河源区 1971—2017 年极端降水时空变化分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021,49(3):288-294. (ZHANG Jing, ZHANG Ke, WANG Sheng, et al. Spatiotemporal variation analysis of extreme precipitation in the Three River Source Area of the Shaanxi-Gansu-Ningxia Contiguous Region from 1971 to 2017 [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(3):288-294. (in Chinese))
- [13] 李林,王振宇,秦宁生,等. 长江上游径流量变化及其与影响因子关系分析[J]. 自然资源学报,2004(6): 694-700. (LI Lin, WANG Zhenyu, QIN Ningsheng, et al. Analysis of the relationship between runoff amount and its impacting factor in the upper Yangtze River[J]. Journal of Natural Resources, 2004(6):694-700. (in Chinese))
- [14] 王顺久. 长江上游川江段气温、降水及径流变化趋势分析[J]. 资源科学,2009,31(7): 1142-1149. (WANG Shunjiu. Changing pattern of the temperature, precipitation and runoff in Chuanjiang Section of the Yangtze River [J]. Resources Science, 2009, 31 (7): 1142-1149. (in Chinese))
- [15] 魏榕,刘冀,张特,等. 雅砻江流域中上游径流变化归因分析[J]. 长江流域资源与环境,2020,29(7): 1643-1652. (WEI Rong, LIU Ji, ZHANG Te, et al. Attribution analysis of runoff variation in the upper-middle reaches of Yalong River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2020,29(7):1643-1652. (in Chinese))
- [16] 叶婷,石朋,钟华,等. 基于 Budyko 假设和微分方程的淮上中游径流变化归因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(5): 25-32. (YE Ting, SHI Peng, ZHONG Hua, et al. Attribution analysis of runoff change in the upper and middle Huaihe River based on Budyko hypothesis and differential equation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(5):25-32. (in Chinese))
- [17] 支童,张洪波,辛琛,等. 秃尾河流域植被覆盖变化及其对径流的影响[J]. 水利水电技术,2021,52(2): 40-52. (ZHI Tong, ZHANG Hongbo, XIN Chen, et al. Vegetation cover variation and its impact on runoff in Tuwei River Watershed [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2021,52(2):40-52. (in Chinese))
- [18] 刘永伟,王文,刘元波,等. 水文模型模拟预报的多源数据同化方法及应用研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(6): 483-491. (LIU Yongwei, WANG Wen, LIU Yuanbo, et al. Advances in multi-source data assimilation approach and application in simulation and forecast of hydrological model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49 (6): 483-491. (in Chinese))
- [19] 张珂,周佳奇,张企诺,等. 栅格岩溶分布式水文模型 [J]. 水资源保护,2022,38(1): 43-51. (ZHANG Ke, ZHOU Jiaqi, ZHANG Qinuo, et al. Grid-based karst distributed hydrological model [J]. Water Resources Protection,2022,38(1):43-51. (in Chinese))
- [20] 张珂,张企诺,陈新宇,等. 栅格新安江-地表地下双人工调蓄分布式水文模型 [J]. 水资源保护,2021,37(5): 94-101. (ZHANG Ke, ZHANG Qinuo, CHEN Xinyu, et al. Gridded Xinanjiang-dual anthropogenic aboveground and underground regulation distributed hydrological model [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (5): 94-101. (in Chinese))
- [21] 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[J]. *Water Resources Research*, 2007,43(11):WR005890.
- [22] 赵昶皓,邢万秋,傅健宇. 基于概率性 Budyko 方程的我国可利用水资源量脆弱性评估[J]. *水资源保护*, 2020, 36(2): 47-52. (ZHAO Yunhao, XING Wanqiu, FU Jianyu. Evaluation of vulnerability of water availability in China based on probabilistic Budyko equation[J]. *Water Resources Protection*, 2020,36(2):47-52. (in Chinese))
- [23] NEARING G S, KRATZERT F, SAMPSON A K, et al. What role does hydrological science play in the age of machine learning? [J]. *Water Resources Research*, 2021,57(3): W1028091.
- [24] 段浩,朱彦儒,赵红莉,等. 考虑人类活动用水的土壤含水量神经网络反演[J]. *水利水电科技进展*, 2021,41(1):49-54. (DUAN Hao, ZHU Yanru, ZHAO Hongli, et al. Inversion of soil moisture using neural network considering human activities [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2021,41(1):49-54. (in Chinese))
- [25] 曹稼玺,王鑫,雷光春. 基于遗传算法优化 BP 神经网络的青藏高原海北高寒湿地 CO₂ 通量模拟及其影响因子研究[J]. *山东大学学报(理学版)*, 2021,56(5): 1-10. (CAO Jiayi, WANG Xin, LEI Guangchun. Simulation of alpine wetlands CO₂ flux and its influencing factors based on BP neural network optimized by genetic algorithm in Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Shandong University(Natural Science)*, 2021,56(5): 1-10. (in Chinese))
- [26] 李京,李金建. 长江上游径流量变化特征及其与气候要素的联系[J]. *科技通报*, 2021,37(9):7-15. (LI Jing, LI Jinjian. The relationship between variation characteristics and climate factors in the upper reaches runoff of the Yangtze River[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2021,37(9):7-15. (in Chinese))
- [27] 蒋佑承. 气候变化下长江源区径流演变规律及其驱动因素分析 [D]. 成都:西华大学, 2021.
- [28] HE J, YANG K, TANG W, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China [J]. *Scientific Data*, 2020,7(1):25.
- [29] YANG K, HE J, TANG W, et al. On downward shortwave and longwave radiations over high altitude regions: observation and modeling in the Tibetan Plateau [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(1): 38-46.
- [30] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56 [M]. Rome:FAO,1998.
- [31] IRMAK S, IRMAK A, ALLEN R G, et al. Solar and net radiation: based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates [J]. *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*, 2003,129(5):336.
- [32] 李天生, 夏军, 匡洋, 等. 不同潜在蒸散发估算方法在汉江流域中上游地区的适用性研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2017,16(6):1-10. (LI Tiansheng, XIA Jun, KUANG Yang, et al. The applicability of various potential evapotranspiration estimation methods in the middle and upper reaches of Hanjiang River Basin[J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2017, 16(6):1-10. (in Chinese))
- [33] LU X, ZHANG H, HAN Y, et al. Applicability and improvement of different evapotranspiration methods of reference crops in Jiangxi Province [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2021,7: S00704.
- [34] BUDYKO M I. Evaporation under natural conditions [M]. Jerusalem: Isr. Program for Science Translate, 1948.
- [35] CHOUDHURY B J. Evaluation of an empirical equation for annual evaporation using field observations and results from a biophysical model [J]. *Journal of Hydrology*, 1999,216(1/2):99-110.
- [36] YANG H, YANG D, LEI Z, et al. New analytical derivation of the mean annual water-energy balance equation [J]. *Water Resources Research*, 2008,44(3):W03410.
- [37] BERGHUIJS W R, LARSEN J R, VAN EMMERIK T H M, et al. A global assessment of runoff sensitivity to changes in precipitation, potential evaporation, and other factors [J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(10): 8475-8486.
- [38] 熊一橙, 徐炜, 张锐, 等. 基于 LSTM 网络的长江上游流域径流模拟研究[J]. *水电能源科学*, 2021,39(9): 22-24. (XIONG Yicheng, XU Wei, ZHANG Rui, et al. Research on runoff simulation in the Upper Yangtze River based on LSTM network [J] *Water Resources and Power*, 2021, 39(9):22-24. (in Chinese))
- [39] ZHU S, LUO X, YUAN X, et al. An improved long short-term memory network for streamflow forecasting in the upper Yangtze River. [J] *Stoch Environment Resources Risk Assessment*, 2020,34:1313-1329.
- [40] 黄钰翰. 基于 VIC 水文模型的 TRMM 降水产品在长江上游径流模拟中的应用 [D]. 南京:南京林业大学, 2017.

(收稿日期:2021-10-13 编辑:王芳)