

环境变化对石栈道站径流量的影响研究

孟鹏飞, 任政, 石彬, 贾腾飞, 王钰娟
(河北工程大学 水利水电学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 环境变化是导致流域水文过程扰动的主要因素, 评估其相对影响对于制定流域水资源规划和管理策略具有重要意义。采用非参数 Mann-Kendall 检验和 Pettitt 检验来诊断石栈道站径流的变化趋势和突变, 以水文气象资料为基础, 构建基于 VIC 径流模拟模型, 并从不同年代来定量分析变化期的环境变化对年径流的影响。结果表明: 石栈道站径流呈现显著下降趋势; 突变发生在 1979 年, 并据此将研究期划分为径流基准期(1959-1979 年)和变化期(1980-1991 年, 2006-2015 年); 模型在研究区域内具有较高的适用性, Nash-Sutcliffe 效率系数和相对误差分别达到模型要求的 0.75 以上及 10% 以下; 在 1980-1991 和 2006-2015 年两个时段内, 气候变化和人类活动对径流减少的影响分别为 14.4%、85.6% 和 15.4%、84.6%。石栈道站径流变化受人类活动影响较大。

关键词: 环境变化; 径流量; 突变分析; 归因识别; VIC 模型; 石栈道水文站; 浊漳河流域

中图分类号: TV121⁺.4; P641.69 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2020)03-0126-06

Impact of environmental change on the runoff of Shizhandao Hydrological Station

MENG Pengfei, REN Zheng, SHI Bin, JIA Tengfei, WANG Yujuan

(School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056002, China)

Abstract: Environmental change is the main factor leading to the disturbance of hydrological processes in a river basin, the evaluation of which is of great importance to the formulation of water resources planning and management strategies. Non-parametric Mann-Kendall test and Pettitt test were used to diagnose the variation trend and abrupt changes of the runoff in the section of Shizhandao Station. Based on hydrological and meteorological data, the VIC model was set up to simulate runoff processes. The influence of environmental change on annual runoff was quantified during different human activity period. The results showed that the runoff of Shizhandao Station presented a decreasing trend, and the abrupt change year appeared in 1979; based on which, the study period was divided into runoff base period from 1959 to 1979 and two change periods, namely 1980-1991 and 2006-2015. The model had a high applicability to the research area, and both the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient and relative error met the requirements of more than 0.75 and less than 10%. During 1980-1991 and 2006-2015, the impact of climate change and human activities on runoff reduction were 14.4%, 85.6%, 15.4% and 84.6%, respectively. Human activities were the main driving force of runoff change of Shizhandao Station.

Key words: environmental change; runoff; abrupt analysis; attribution recognition; VIC model; Shizhandao Hydrological Station; Zhuozhang River Basin

1 研究背景

浊漳河流域是我国水事纠纷冲突最频繁的地区

之一^[1], 也是最易受环境变化影响的地区之一^[2]。石栈道站是浊漳北源极其重要的径流观测站, 至 20 世纪 60 年代以来, 径流呈现显著的减少趋势, 给流

收稿日期: 2019-06-01; 修回日期: 2019-10-06

基金项目: 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究基金项目(IWHR-SKL-KF201812)

作者简介: 孟鹏飞(1994-), 男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 研究方向为水文学与水资源。

通讯作者: 任政(1975-), 男, 四川蓬溪人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为水文物理规律及径流模拟。

域水资源管理带来了巨大挑战。有效的水资源管理对区域社会经济健康发展至关重要,未来区域水资源规划需要全面了解环境变化对径流过程的影响^[3],定量确定径流变化的主导因素即归因分析已成为制定未来有效水资源管理的前提之一。

目前,气候变化和人类活动是影响径流变化的主要环境因素。弹性系数法和水文模拟法为应用于定量评估环境变化对径流影响的两种主要方法。弹性系数法对原始数据的要求较低,能单独评估各影响因素的影响值^[4],如 PENG 等^[5]采用双累积曲线法和弹性系数法研究太湖流域,结果表明径流变化主要受人类活动的影响。然而,弹性系数法仅能定量分析年尺度上的环境变化的影响^[6]。

水文模拟法基于物理分布的水文模型,可应用在月尺度或日尺度等多种尺度上^[7],该模型模拟结果精度较高,更能合理地模拟降雨径流过程,还可与多种模型耦合嵌套使用^[8]。ZENG 等^[9]采用 SIM-HYD 模型对漳河流域不同时间尺度的径流进行研

究,结果表明气候变化和人类活动对月径流量变化的影响在不同月份是不同的。黄亚等^[10]将 CMIP5 和 VIC 模型嵌套,分析了红水河上游流域未来径流量的变化情况。

本研究以石栈道水文站为研究对象,以水文气象资料为基础,使用 VIC 水文模型从不同年代来定量评估环境变化对石栈道水文站年径流的影响,以期对石栈道站洪水预报、浊漳河流域水资源规划提供相关依据。

2 研究区域及数据来源

浊漳河是海河流域漳卫河水系漳河上游的一条支流,分为北源、南源和西源。浊漳河北源发源于山西省榆社县柳树沟。石栈道站是浊漳北源上游重要水文站,在浊漳河上游石栈道村的榆社河上,位于 112°47' ~ 113°9' E, 37°4' ~ 37°24' N 之间,其控制流域面积为 702 km²,研究区域水系及气象、水文站点分布如图 1 所示。

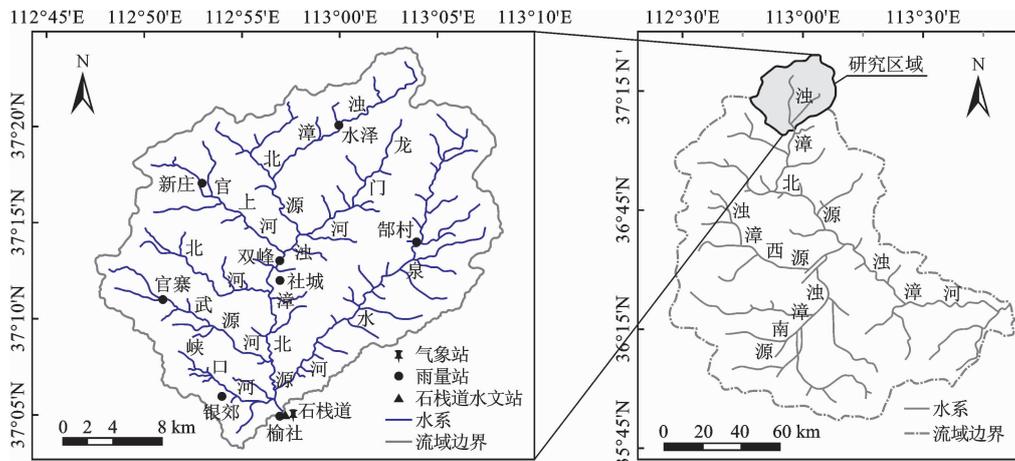


图 1 研究区域水系及气象、水文站点分布图

气象数据包括:(1)研究区内石栈道、新庄、社城、水泽、官寨、郜村、银郊和双峰 8 个降水观测站,时段为 1959 - 2015 年的实测日数据,数据来源为《水文年鉴》;(2)研究区周边邢台、阳城、介休、平定、太原、安泽、襄垣、长治和榆社共 9 个国家气象站,时段为 1953 - 2015 年的平均气温、最高气温、最低气温和平均风速的日数据,数据来源为《中国气象数据共享服务网》。石栈道站日平均径流数据来源为《水文年鉴》,时段为 1959 - 1991 年和 2006 - 2015 年。其他数据,如 DEM 数据来源于地理空间数据云,植被数据采用马里兰大学发展的全球 1 km 的土地覆盖数据,土壤数据采用 Harmonized World Soil Database。

3 研究方法

3.1 Mann - Kendall 趋势检验

给定水文时间序列 $X\{x_i, i = 1, 2, \dots, n\}$ 进行趋势检验,定义统计量 S 的计算公式为^[11]:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \operatorname{sgn}(x_j - x_i) \quad (j = 2, 3, 4, \dots, n) \quad (1)$$

其中函数 $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 定义如下:

$$\operatorname{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & x_j > x_i \\ 0 & x_j = x_i \\ -1 & x_j < x_i \end{cases} \quad (2)$$

Mann(1945)和Kendall(1975)指出:统计量 S 近似服从正态分布,统计量的均值和方差分别为 $E(S) = 0$ 和 $\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$,则水文时间序列标准化后的检验统计量 Z 定义为^[11]

$$Z = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{\text{Var}(S)} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ (S+1)/\sqrt{\text{Var}(S)} & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: n 为水文时间序列的长度。

根据Mann-Kendall法原理,以统计量 Z 值判断径流序列变化趋势^[12]。统计量 Z 为正表示序列呈现增加趋势, Z 为负表示序列具有递减趋势^[11]。若 $|Z| > 1.96$,序列变化趋势通过5%显著水平检验。

3.2 Mann-Kendall 突变检验

对水文时间序列 $X\{x_i, i=1,2,\dots,n\}$ 进行突变检验,构建秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^i r_{ij} \quad (k=2,3,4,\dots,n) \quad (4)$$

其中 r_{ij} 定义如下:

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i \leq x_j \end{cases} \quad (j=1,2,3,\dots,i) \quad (5)$$

产生的秩序列 S_k 近似服从正态分布, S_k 的均值 $E(S_k)$ 和方差 $\text{Var}(S_k)$ 的计算公式为:

$$E(S_k) = \frac{k(k-1)}{4} \quad (6)$$

$$\text{Var}(S_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad (7)$$

定义统计变量:

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}} \quad (8)$$

$(k=1,2,\dots,n), UF_1 = 0$

将所有的 UF_k 值绘制成曲线 UF 。按时间顺序逆序排序时间序列 X ,重复上述步骤,得到反序列的 UB_k ,然后乘以 (-1) ,得到一条曲线 UB 。在同一个图中,绘制这两条曲线。在临界值内,两条曲线的交点为水文时间序列的突变点。

3.3 Pettitt 突变检验

假设水文时间序列 X 在时刻 t 发生了突变,将时刻 t 作为序列 X 的分割点,将序列分为两部分,定义统计量 $U_{t,n}$ ^[11]:

$$U_{t,n} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (9)$$

$(t=2,3,4,\dots,n)$

式中: $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数,见公式(2)所示,则统计量 $U_{t,n}$ 的极小值点为序列的突变点。

突变点可能的显著性水平 P 定义为:

$$P = \exp\left(\frac{-6U_{t,n}^2}{n^3 + n^2}\right) \quad (10)$$

若 $P \leq 0.05$,则认为该点通过5%显著水平检验。

3.4 构建基于VIC模型的径流变化归因分析模型

根据石栈道站年径流序列,进行趋势和突变分析,将径流序列划分为基准期和变化期。基于基准期的水文气象资料,构建基于VIC径流模拟模型,并率定和检验模型的各项参数,模型的各项参数见表1。基于变化期的气象资料,模拟石栈道站变化期逐月径流过程,按照以下公式定量评估变化期环境变化对径流变化的贡献率^[13]。

$$\Delta W_T = W_{HR} - W_B \quad (11)$$

$$\Delta W_H = W_{HR} - W_{HN} \quad (12)$$

$$\Delta W_C = W_{HN} - W_B \quad (13)$$

$$\eta_H = \Delta W_H / \Delta W_T \quad (14)$$

$$\eta_C = \Delta W_C / \Delta W_T \quad (15)$$

式中: ΔW_T 为石栈道站径流变化量, m^3 ; W_{HR} 为石栈道站变化期多年平均径流量, m^3 ; W_B 为石栈道站基准期多年平均径流量, m^3 ; ΔW_H 为人类活动对径流的贡献量, m^3 ; W_{HN} 为石栈道站变化期水文模型模拟的多年平均径流量, m^3 ; ΔW_C 为气候变化对径流的贡献量, m^3 ; η_H 为人类活动对径流的贡献百分比; η_C 为气候变化对径流的贡献百分比。

表1 VIC模型参数及取值范围

参数	参数含义	参考取值范围
B	饱和容量曲线形状参数	0~0.4
D_{smax}	基流最大流速	0~30
D_s	非线性基流因子	0~1
W_s	基流发生土壤蓄水因子	0~1
d_1	第1层土壤厚度/m	通常取0.1
d_2	第2层土壤厚度/m	0.1~1.5
d_3	第3层土壤厚度/m	0.1~1.5

4 结果与分析

4.1 径流趋势分析

根据石栈道站1959-1991年连续实测径流资料,绘制年径流与年份相关图和5a滑动平均年径流与年份相关图,如图2所示。从图2可以看出,无论是年径流过程和5a滑动平均年径流过程,石栈道站径流过程均呈现减少趋势,多年平均递减率为 $188 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

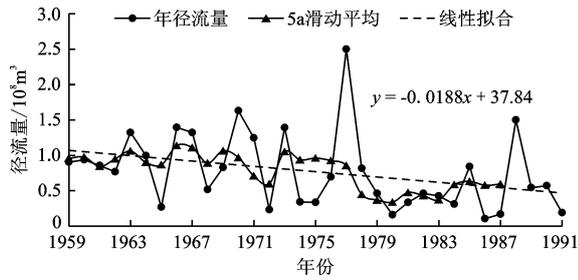


图 2 石栈道水文站年径流趋势分析

为进一步验证石栈道径流变化趋势,采用 Mann - Kendall 进行趋势检验,见表 2 所示。

表 2 石栈道站实测径流量趋势性检验表

线性拟合		Mann - Kendall 趋势检验			
$K/10^4(m^3 \cdot a^{-1})$	趋势	Z	临界值	趋势	显著性
-188	下降	-2.26	-1.96	下降	显著

从表 2 中可以看出,统计量 $Z < 0$,年径流序列呈减少趋势;且 $|Z| > 1.96$,年径流序列变化趋势通过 5% 显著水平检验。因此,石栈道站 1959 - 1991 年径流序列,年平均递减率 $188 \times 10^4 m^3/a$,且递减趋势显著,这与相关文献分析结果是一致的^[14]。

4.2 径流基准期划分

根据石栈道站 1959 - 1991 年连续实测径流资料,分别采用 Mann - Kendall 和 Pettitt 方法进行突变检验,结果见图 3 和 4 所示。

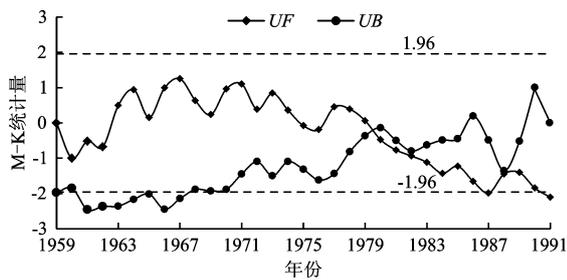


图 3 基于 Mann - Kendall 方法的石栈道水文站 1959 - 1991 年径流量突变检验

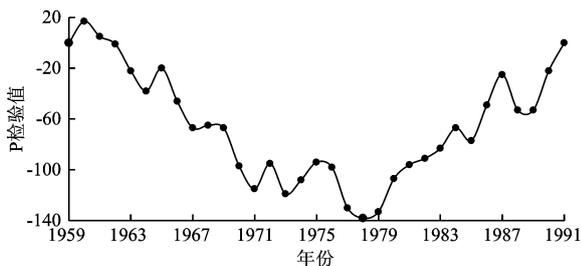


图 4 基于 Pettitt 方法的石栈道水文站 1959 - 1991 年径流量突变检验

由图 3 可以看出, Mann - Kendall 检验的 UF、

UB 曲线的相交点位于 1979 - 1980 年,石栈道水文站年径流量的突变点在 1979 年前后,突变检验结果见表 3。由图 4 可以看出, Pettitt 检验值的极小值出现在 1979 年且 $P = 0.0467$ (结果见表 3),石栈道水文站年径流量的突变点为 1979 年,且突变通过 5% 显著水平检验,突变显著。

表 3 石栈道站年径流量时间序列突变检验结果

Mann - Kendall 检验	Pettitt 检验		综合分析
	突变年份	显著性水平	
1979 - 1980 年	1979 年	0.0467	1979 年

根据 Mann - Kendall 和 Pettitt 法对石栈道站 1959 - 1991 年径流量序列的突变检验结果,综合选择 1979 年作为年径流量序列的突变点。突变点将年径流量时间序列划分为径流量基准期 (1959 - 1979 年) 和变化期 (1980 - 1991 年、2006 - 2015 年),这与相关文献分析结果是一致的^[14]。

4.3 基于 VIC 模型的径流量变化归因分析

选取基准期的年径流量序列,构建基于 VIC 模型,模拟石栈道站径流量过程。在 VIC 模型参数率定过程中,考虑到模型的状态变量对模拟值的影响,将 1959 - 1962 年定为模型的预热期,1963 - 1972 年定为模型的参数率定期,1973 - 1979 年为模型参数的验证期。

选取 9 个国家气象站气温数据,率定研究区的日平均气温、日最高气温和日最低气温梯度,以研究区最近的榆社站气温为基础,插值研究区 $1 km \times 1 km$ 的网格日气温值,网格风速采用榆社站同期风速值,网格日降水为研究区 8 个降水观测站的插值结果,构建石栈道站基准期径流量过程模拟的 VIC 模型,调整 VIC 模型参数,具体参数值见表 4 所示。

表 4 VIC 模型各参数率定结果

B	D_{smax}	D_s	W_s	d_1	d_2	d_3
0.39	20	0.02	0.6	0.1	0.1	0.5

对比模型模拟值和实测值,采用 N_{sc} 系数作为率定和验证参数的目标函数,并计算其相对误差 Re_o 。若 N_{sc} 系数越高,则意味着模拟值与实测值吻合度越强。1963 - 1979 年石栈道站逐月径流量实测值和模型模拟值对比结果如图 5 所示。

从图 5 中可以看到, VIC 模型模拟过程与石栈道站实测径流量过程拟合较好,洪峰出现的时间基本一致。VIC 模型模拟的月径流量结果中,率定期

的 N_{sc} 系数和相对误差 Re 分别为 0.88 和 3.77%, 验证期的 N_{sc} 系数和相对误差 Re 分别为 0.92 和 -7.54%, 其中相对误差 Re 绝对值均控制在 10% 以内。分析年平均径流量时, 发现年径流量的模拟值与实测值较为接近, 率定期的 N_{sc} 系数和相对误差 Re 分别为 0.96 和 3.24%, 验证期的 N_{sc} 系数和相对误差 Re 分别为 0.81 和 -1.80%, 其中相对误差 Re 绝对值均控制在 5% 以内, 具体统计结果见表 5。

VIC 模型目标函数和相对误差均达到模型要求的 0.75 以上及 10% 以下。因此, VIC 模型还原石栈道站的径流量变化期过程较为合理。模型在研究区域内具有较高的适用性和可信度。

根据基准期构建的 VIC 模型, 结合相关数据资

料, 模拟出石栈道站径流量变化期的月径流量数据。依据实测数据资料, 并将径流量变化期分为 2 个时段, 即 1980 - 1991 年和 2006 - 2015 年。对比分析变化期实测径流量和模型模拟径流量结果, 如图 6 所示。评估石栈道站径流量对环境变化的响应值, 具体计算结果见表 6。

表 5 石栈道站 VIC 模型目标函数和相对误差统计表

月径流量		年平均径流量					
率定期		验证期		率定期		验证期	
N_{sc}	$Re / \%$						
0.88	3.77	0.92	-7.54	0.96	3.24	0.81	-1.80

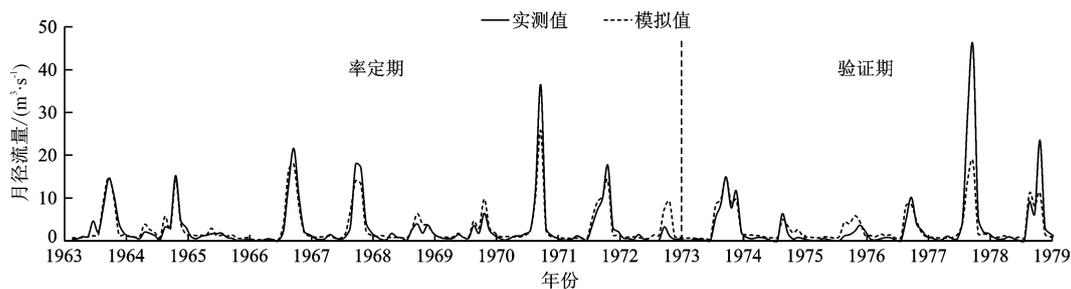


图 5 1963 - 1979 年石栈道水文站流域逐月径流量实测与模拟结果

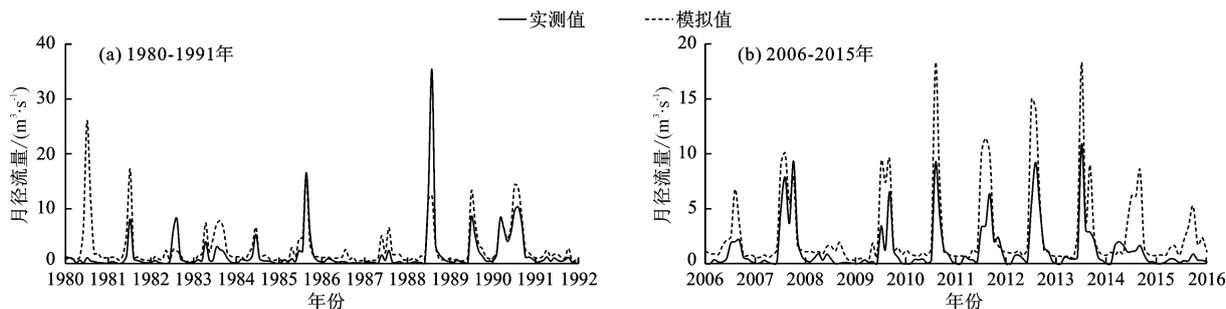


图 6 石栈道水文站径流量变化期 2 个时段逐月径流量实测域模拟结果

表 6 气候变化与人类活动对流域径流量变化的影响

时段(年份)	实测降水 平均值	实测径流 量平均值	模拟径流 量平均值	径流量总 增加值	气候变化 贡献值	人类活动 贡献值	气候变化 贡献率	人类活动 贡献率
1959 - 1979	516.9	134.1						
1980 - 1991	490.4	66.7	124.4	-67.4	-9.7	-57.7	14.4	85.6
2006 - 2015	515.4	58.6	122.5	-75.5	-11.6	-63.9	15.4	84.6

由表 6 中可知: (1) 与基准期相比, 1980 - 1991 年实测降水量有所下降, 2006 - 2015 年实测降水量基本持平。而实测径流量过程与降水的变化趋势有所不同, 实测径流量在不同时段内均有所下降。(2) 径流量的变化量在两个时段均为负值, 这说明由人类活动引起的下垫面的变化减小了流域的产流

能力。人类活动在这两个时段内对区间产流减小的贡献率分别为 85.6% 和 84.6%。气候变化在这两个时段内对区间产流减小的贡献率分别为 14.4% 和 15.4%, 贡献率随着区间降水量的增加而增大。(3) 环境变化对径流量的贡献率在各个时段是不尽相同的, 在 1980 - 1991 年和 2006 - 2015 年两个时

段内,均是人类活动占主导地位。

5 结 论

(1)石栈道站年径流量呈现明显下降趋势,根据 Mann-Kendall 突变检验 1979-1980 年为径流量突变点, Pettitt 检验突变点为 1979 年,综合分析,确定突变年份为 1979 年。将 1959-1979 年作为石栈道径流量时间序列的基准期。

(2)VIC 模型模拟的基准期月径流量结果中,率定期的 N_{sc} 系数和相对误差 Re 分别为 0.88 和 3.77%,验证期的 N_{sc} 系数和相对误差 Re 分别为 0.92 和 -7.54%。分析基准期的年平均径流量,发现年径流量的模拟值与实测值较为接近,率定期的 N_{sc} 系数和相对误差 Re 分别为 0.96 和 3.24%,验证期的 N_{sc} 系数和相对误差 Re 分别为 0.81 和 -1.80%,均达到模型要求的 0.75 以上及 10% 以下的要求。因此,VIC 模型还原石栈道站变化期的径流量过程较为合理。模型在研究区域内具有较高的适用性和可信度。

(3)根据 VIC 模型模拟变化期的径流量过程,人类活动和气候变化的影响值在不同时段是不尽相同的,在 1980-1991 年和 2006-2015 年两个时段内,浊漳河石栈道站径流量变化受人类活动影响较大。人类活动对径流量减少的影响分别为 85.6% 和 84.6%,远大于气候变化 14.4% 和 15.4% 的影响。

参考文献:

- [1] 徐士忠. 漳河上游水事纠纷的现状、存在问题与对策研究[J]. 海河水利, 2007(2): 14-17.
- [2] 刘春蓁, 刘志雨, 谢正辉. 近 50 年海河流域径流的变化趋势研究[J]. 应用气象学报, 2004, 15(4): 385-393.
- [3] LIANG Wei, BAI Dan, WANG Feiyu, et al. Quantifying the impacts of climate change and ecological restoration on streamflow changes based on a Budyko hydrological model in China's Loess Plateau[J]. Water Resources Research, 2015, 51(8): 6500-6519.
- [4] WANG Dingbao, HEJAZI M. Quantifying the relative contribution of the climate and direct human impacts on mean annual streamflow in the contiguous United States[J]. Water Resources Research, 2011, 47(10): 411.
- [5] PENG Dingzhi, QIU Linghua, FANG Jing, et al. Quantification of climate changes and human activities that impact runoff in the Taihu Lake basin, China[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016, 2016(3-4): 1-7.
- [6] 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.
- [7] 王国庆, 张建云, 贺瑞敏. 环境变化对黄河中游汾河径流情势的影响研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(6): 853-858.
- [8] 徐宗学, 程磊. 分布式水文模型研究与应用进展[J]. 水利学报, 2010, 41(9): 1009-1017.
- [9] ZENG Sidong, XIA Jun, DU Hong. 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.
- [10] 黄亚, 肖伟华, 陈立华, 等. 基于 VIC 模型的气候变化对红水河上游流域径流影响研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2018, 43(1): 406-415.
- [11] ZHAO Guangju, TIAN Peng, MU Xingmin, et al. Quantifying the impact of climate variability and human activities on streamflow in the middle reaches of the Yellow River basin, China[J]. Journal of Hydrology, 2014, 519(Part A): 387-398.
- [12] 肖洁, 罗军刚, 解建仓, 等. 渭河干流径流年际及年内变化趋势分析[J]. 人民黄河, 2012, 34(11): 32-36.
- [13] 任政, 盛东, 张丽. 环境变化对湘江湘潭站径流的影响研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(6): 145-149.
- [14] 高云明, 魏琳, 万思成, 等. 漳河流域近 60 年径流变化分析[J]. 水文, 2016, 36(3): 91-95.
- [15] 夏军, 马协一, 邹磊, 等. 气候变化和人类活动对汉江上游径流变化影响的定量研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 1-6.
- [16] 陈鑫, 刘艳丽, 刁艳芳, 等. 基于 SWAT 模型对气候变化与人类活动影响下径流变化的量化分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(4): 9-18.
- [17] 王彦君, 王随继, 苏腾. 降水和人类活动对松花江径流量变化的贡献率[J]. 自然资源学报, 2015, 30(2): 304-314.
- [18] 黄亚, 肖伟华, 陈立华, 等. 基于 VIC 模型的气候变化对红水河上游流域径流影响研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2018, 43(1): 406-415.
- [19] 陈宏, 尉英华, 王颖, 等. 基于 VIC 水文模型的滦河流域径流变化特征及其影响因素[J]. 干旱气象, 2017, 35(5): 776-783.
- [20] 李宗华. 基于 SWAT 模型的漳河上游流域径流模拟研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2015.