水利水运工程学报
HYDRO-SCIENCE AND ENGINEERING

气候变化和人类活动对流域径流及其年内分配的影响

郭心仪，贾雨凡，范丽丽，王国庆

The effects of climate change and human actions on runoff and its seasonal variation

GUO Xinyi, JIA Yufan, FAN Lili, WANG Guoqing

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12170/20231001001

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

海河流域径流变化趋势及其归因分析
Analysis of runoff change trend and its attribution in Haihe River basin
水利水运工程学报. 2017(4): 59 https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.04.009

大渡河流域年径流变化特征及其归因分析
Variation characteristics of annual runoff and its attribution analysis in Dadu River basin
水利水运工程学报. 2021(3): 96 https://doi.org/10.12170/20200608001

气候变化下黄河流域未来水资源趋势分析
The future water resources regime of the Yellow River basin in the context of climate change
水利水运工程学报. 2020(2): 1 https://doi.org/10.12170/20200216001

流域水沙变化和人类活动对长江口河槽演变的影响
New trends of river channel evolution of the Yangtze River estuary under the influences of inflow and sediment variations and human activities
水利水运工程学报. 2021(2): 1 https://doi.org/10.12170/20200313001

基于分形和R/S分析的渭河干流径流变化特征研究
Analysis of runoff variation characteristics in the mainstream of Weihe River based on fractal theory and R/S analysis method
水利水运工程学报. 2019(1): 102 https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.01.013

黄河流域典型流域水文气象变化与径流过程模拟
Typical hydro-meteorological changes and runoff process simulation in Yellow River basin
水利水运工程学报. 2019(5): 36 https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.05.005

扫码进入官网，阅读更多精彩文章

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20231001001
郭心仪, 贾雨凡, 范丽丽, 等. 气候变化和人类活动对流域径流及其年内分配的影响 [J]. 水利水运工程学报, 2024(2): 10-19. (GUO Xinyi, JIA Yufan, FAN Lili, et al. The effects of climate change and human actions on runoff and its seasonal variation[J]. Hydro-Science and Engineering, 2024(2): 10-19. (in Chinese))

气候变化和人类活动对流域径流及其年内分配的影响

郭心仪[1, 2, 3], 贾雨凡[2, 3, 4], 范丽丽[1], 王国庆[1, 2, 3]

(1. 南京水利科学研究院 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029; 2. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学 水安全与水科学协同创新中心, 江苏 南京 210098; 4. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 气候变化和人类活动对流域径流有着显著影响, 径流变化的定量归因计算是流域管理的重要工作。采用 M-K 突变检验界定葫芦河流域径流的基准期和影响期, 基于 SWAT 模型模拟结果量化气候变化、土地利用变化和其他人类活动对流域径流变化的贡献。结果表明: (1)1961—2014 年葫芦河流域年径流量先增后减, 整体呈下降趋势, 1986 年变化较为显著。(2)SWAT 模型能较好模拟葫芦河流域天然径流量过程, 率定期和验证期的纳什效率系数大于 0.74、决定系数大于 0.75。(3)1986—2014 年葫芦河流域年均径流量相较于基准期(1961—1985 年)减少了 2.95 亿 m^3, 其中气候变化、土地利用变化和其他人类活动的贡献分别为 67%、2% 和 31%; 在影响Ⅰ期(1986—1999 年)和Ⅱ期(2000—2014 年)内, 气候变化对径流减少的贡献分别占 96% 和 44%, 其他人类活动分别占 3% 和 52%, 土地利用变化分别占 1% 和 4%。(4)2000—2014 年, 土地利用变化和其他人类活动作用下, 月径流量均表现为减少; 气候变化对径流量的影响在 1 月和 12 月表现为增加, 在其余月份表现为减少。2000 年前气候变化是葫芦河流域径流的主要影响因素, 2000 年后人类活动是葫芦河流域径流的主要影响因素。研究结果可为土地利用结构优化和水资源合理利用提供参考。

关 键 词: 流域管理; 径流变化; 气候变化; 人类活动; SWAT 模型; 归因分析; 葫芦河流域

中图分类号: P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2024)02-0010-10

地表径流对人们的生产生活极其重要[1], 但其时空演变会受到气候变化和人类活动的影响, 这种影响并非由流域内单个要素造成, 而是由多种要素之间的相互作用所导致[2]。因此, 定量分析人类活动和气候变化对径流变化的贡献具有重要的研究价值。随着人口增长带来的水资源消耗增加及气候变暖导致的蒸发量增大, 流域水资源的供需矛盾不断加剧[3]。定量揭示气候变化和人类活动对流域尺度水资源的影响[4–6], 对解决水资源供需不平衡问题至关重要。在定量识别气候变化和人类活动对径流影响方面, 有水文模型法[7-8]、弹性系数法[9-10] 等, 目前较多采用水文模型法。张利平等[11] 基于 SWAT 模型定量评估了气候波动、人类活动和土地利用变化对滦河流域径流的改变, 并认为人类活动是影响径流的主要因素; 刘剑宇等[12] 采用水文模型和多元回归相结合的方式定量评估鄱阳湖“五河”径流对气候变化和人类活动的响应, 得出气候变化主要影响饶河、信江和赣江的径流, 而人类活动主要影响修水和抚河的径流的结论。基于 Budyko 的弹性系数法的应用较为广泛, 但主要用于年径流的归因; 对于月径流归因方法, 除了分布式水文模型法也有其他方法。如 Xin 等[13] 基于扩展 Budyko 方法明确了中国 191 个流域气候变化和人类活动对径流年尺度和季节尺度的影响, 发现气候变化在长江流域、东南诸河流域和珠江流域是主导因素, 人类活动在华北地区是

收稿日期: 2023-10-01
基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目 (2021YFC3201104); 国家自然科学基金资助项目 (U2243228, 52121006, 41961124007); 内蒙古自治区 “揭榜挂帅”项目(2023JBGS0007)
作者简介: 郭心仪(2001—), 女, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: 18810181807@163.com 通信作者: 王国庆(E-mail: gqwang@nhri.cn)

主导因素; 何玉芬等[9] 基于 ABCD 模型结合弹性系数法定量计算了北大沙河流域气候变化和人类活动在年尺度和月尺度上对径流的影响; He 等[14] 基于 Budyko 方程的分解方法量化了气候变化和人类活动对辉发河流域年尺度和季节尺度上流量变化的贡献, 并用 ABCD 模型进一步验证了结果, 认为人类活动的影响更为显著。

针对渭河上游流域生态环境脆弱和水资源供需不平衡加剧的问题[15−18], 本文以渭河的重要水源区葫芦河流域为研究对象, 基于 SWAT 模型模拟结果定量归因分析气候变化、土地利用变化和其他人类活动对流域径流的贡献, 以期为渭河上游葫芦河流域因气候变化和人类活动加剧所引发的水资源短缺问题提供参考, 为流域生态建设和高质量发展提供借鉴。

1　材料与方法

葫芦河是渭河上游最大的支流, 发源于宁夏固原市西吉县的月亮山, 经天水三阳川流入渭河。葫芦河流域地势东北高西南低, 高程分布在 1 190~2 924 m, 秦安水文站以上控制面积为 9 780 km^2。该流域位于副热带气候区, 属于大陆性干旱气候, 多年平均降水量为 508 mm, 降水年内分配不平衡, 其中夏季降水最多; 多年平均气温约 6.94 ℃。流域上游为林区, 植被茂密, 森林覆盖率高; 而中下游则主要是耕地和草地, 水土流失严重。流域内的土壤类型主要有黑钙土、雏形土、灰色土和淋溶土等[19]。流域水系及水文站、气象站地理位置见图 1。

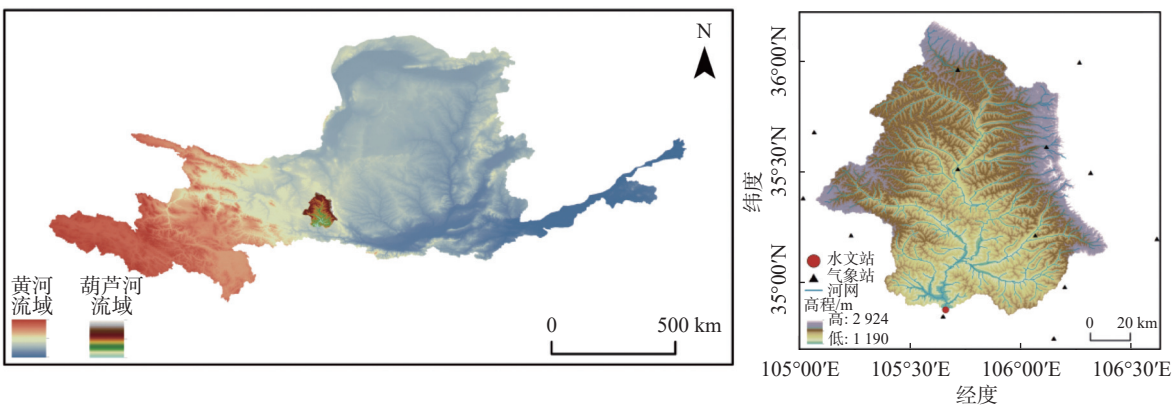


图 1　研究区地理位置

Fig. 1　Study area location

1.1　数据来源

本研究采用葫芦河流域空间数据和属性数据进行模拟。数据包括数字高程数据(DEM)、1980、1995 和 2010 年土地利用数据、2009 年土壤数据、1961—2014 年 13 个站点的气象数据和秦安水文站的径流数据。采用 SWAT 模型进行建模, 所需数据的类型和格式等信息见表 1。

表 1　SWAT 模型所需数据

Tab. 1　The data required for the SWAT model

数据类型	分辨率	格式	数据来源	数据描述
DEM图	30 m×30 m	GRID	地理空间数据云(ASTER GDEM 30 m分辨率数字高程数据)	高程、坡面
土地利用图	1 000 m×1 000 m	GRID	国家青藏高原科学数据中心(中国土地利用数据)	土地利用空间分布
土壤类型图	900 m×900 m	GRID	国家青藏高原科学数据中心(基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集v1.1 2009)	土壤类型空间分布
气象数据	日尺度	TXT	气象数据共享网	降水、气温、大小型蒸发、相对湿度、风速、日照时数
水文数据	月尺度	TXT	黄河流域水文年鉴	径流

1.2 研究方法

1.2.1 SWAT 模型 SWAT 模型融合了多个模型的特点,并在应用中不断改进,模型可以将流域离散化来反映土壤物理性质、土地利用方式、坡度和高程等方面的空间差异并模拟水文要素的时空演变过程[20-22]。根据 SWAT 水文模型输入数据要求,对所收集数据进行预处理。本文基于 DEM 数据生成葫芦河的河网数据和流域边界,并将空间分布图的地理坐标系栅格投影为 GCS_WGS_1984,投影坐标系栅格投影为 WGS_1984_UTM_Zone_48N。根据土地利用分类标准对其进行分类,最终分为耕地、林地、草地、水域、居民用地和未利用土地等 6 种类型。提取 13 个气象站的气象数据计算各类气象数据的统计量,并按照 SWAT 模型规定的数据格式进行修改。

基于数字地理高程数据(DEM)、土壤分布数据、土壤物理性质、土地利用分布数据和 5 种日尺度气象数据(降水、最高最低气温、风速、太阳辐射、相对湿度)建立模型[23]。选取 3 个主要指标对模型的模拟效果进行评定: Nash-Sutcliffe 效率系数 N_S、决定系数 R^2、偏差系数 P[24]。N_S 说明模拟的优劣,取值范围由负无穷至 1,越接近 1 表明模型模拟的准确度越高; R^2 表征实测值与模拟值间的拟合情况,取值区间从 0 至 1,越接近 1 表示拟合结果越好; P 表征模拟值与实测值的系统性偏差程度,取值范围从−100% 到 100%,越接近 0 说明模拟的系统性偏差越小。当 $0.5 \leqslant R^2 < 0.7$ 时模拟结果可以接受, $R^2 \geqslant 0.7$ 时模拟结果比较准确; 当 $0.50 \leqslant N_S \leqslant 0.65$ 时模拟结果可以接受, $0.65 < N_S \leqslant 0.75$ 时模拟结果较好, $N_S > 0.75$ 时模拟结果比较准确; 当 $-25\% \leqslant P \leqslant 25\%$ 时,模拟结果比较准确[24-25]。

1.2.2 径流定量归因分析方法 根据 Mann-Kendall 突变检验[26] 将研究时段划分为基准期和影响期。基准期和影响期的实测径流之差为总径流变化量,假设气候变化和人类活动对径流的影响相互独立,总径流变化量可以分为气候变化和人类活动影响量两部分,其中人类活动影响量分为土地利用和除土地利用外的其他人类活动(水利工程和工农业生活用水等)影响量。上述相关具体计算如下:

$$\Delta W_T = W_{BO} - W_{IO} \tag{1}$$

$$\Delta W_T = \Delta W_H + \Delta W_C = (\Delta W_{LU} + \Delta W_{OH}) + \Delta W_C \tag{2}$$

式中: ΔW_T 为总径流的减少量; W_{BO}、W_{IO} 分别为基准期和影响期的实测径流量; ΔW_H、ΔW_C、W_{LU}、W_{OH} 分别为人类活动、气候变化、土地利用、其他人类活动影响的径流减少量。

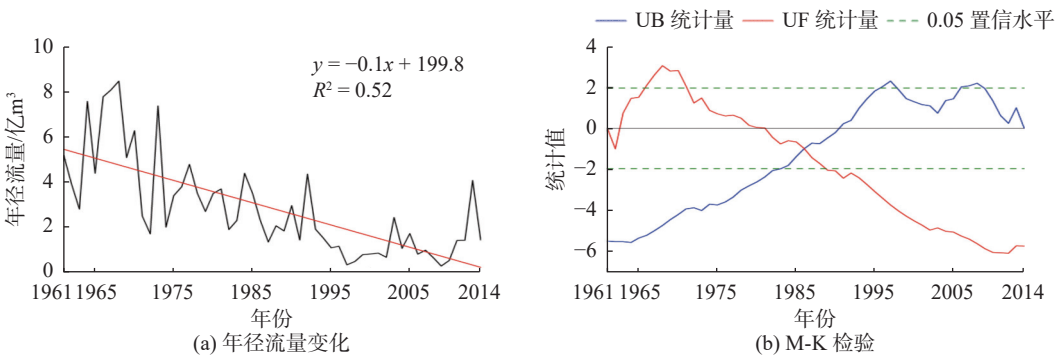
采用基准期的实测流量对 SWAT 模型进行率定和验证,在模拟效果较好的前提下认为率定得到的参数代表了流域受人类活动干扰较小时的除土地利用以外的下垫面属性[11]。在不改变参数的基础上,输入影响期的气象数据进行模型模拟,模拟得到的多年平均径流与基准期多年平均径流之差为气候变化对径流的影响量,即 $\Delta W_C = W_{BO} - W_{IS}$, 其中: W_{IS} 为土地利用不改变条件下影响期的模拟径流量。

在不改变参数的基础上,分别输入影响期的土地利用和气象数据进行模型模拟,模拟得到多年平均径流与基准期多年平均径流之差,即为气候变化和土地利用变化对径流的总影响量, $\Delta W_C + \Delta W_{LU} = W_{BO} - W_{ISL}$, 其中: W_{ISL} 为土地利用改变条件下影响期的模拟径流量。

2 结果分析

2.1 葫芦河流域径流演变特征

基于 1961—2014 年实测径流序列,采用 Mann-Kendall 检测方法诊断径流突变。图 2 给出了葫芦河流域年径流量变化趋势及 M-K 突变检验结果。



(a) 年径流量变化　　(b) M-K 检验

图 2　葫芦河流域年平均径流量年际变化趋势和 M-K 检验

Fig. 2　The inter-annual trend of mean annual runoff in the Hulu River Basin and M-K test

由图 2 可知, 1961—2014 年葫芦河流域年径流量先增后减, 整体呈下降趋势, 变化范围是(0.27~8.50)亿 m^3。根据 M-K 检验图, 1961—1989 年葫芦河流域年径流量趋势性变化不显著, 而在 1990—2019 年流域年径流量表现为显著减少趋势(p<0.05)。同时, M-K 检验图中 UB 和 UF 在 1986 年出现交点且该交点位于置信区间, 认为葫芦河流域径流在 1986 年发生突变且径流量在突变点后显著减少。结合土地利用等流域相关资料分析, 将 1986 年定为人类活动对葫芦河流域径流影响的突变点, 将突变点以前作为不受人类活动影响或人类活动干扰较小的基准期(1961—1985 年), 突变点以后作为人类活动影响期(1986—2014 年)。其中, 影响期又根据土地利用变化划分为影响 I 期及影响 II 期。影响 I 期采用 1995 年土地利用资料设置为 1986—1999 年; 影响 II 期采用 2010 年土地利用资料设置为 2000—2014 年。

2.2　SWAT 模型模拟与验证

对突变点以前受人类活动干扰较小的基准期进行 SWAT 模型模拟与验证, 将 1961—1975 年设置为率定期, 1976—1985 年设置为验证期。输入 1961—1985 年气象数据、2009 年土壤数据及 1980 年土地利用数据进行模型模拟, 采用葫芦河流域出口秦安水文站的月流量数据进行模型验证, 选择 13 个参数来率定模型模拟结果, 率定后的参数值见表 2。借助 SWAT-CUP 软件分析计算这些参数对径流的敏感度, 其中, 对葫芦河流域径流影响较大的参数分别有 SCS 径流曲线系数(CN2)、河道调蓄系数(ALPHA_BNK)、地下水再蒸发系数(GW_REVAP)和土壤蒸发补偿系数(ESCO), 这些高敏感性参数表明葫芦河流域径流易受降雨前期流域特征、河道调蓄、地下水水位和土壤水蒸发能力的影响[19-20]。对流域径流影响较小的参数为降雪气温阈值(SFTMP)和地下水延迟时间(GW_DELAY)。

表 2　葫芦河流域参数率定值

Tab. 2　Parameter rate values for the Hulu River Basin

名称	含义	率定值	名称	含义	率定值
CN2	SCS径流曲线系数	65.09	CH_N2	主河道曼宁系数	0.15
ALPHA_BNK	河道调蓄系数	0.99	SOL_K	土壤饱和传导率/(mm/h)	7.91
GW_REVAP	地下水再蒸发系数	0.09	SOL_AWC	表层土壤有效含水量/(mm/mm)	0.14
ESCO	土壤蒸发补偿系数	0.03	ALPHA_BF	基流消退系数	6.29×10^{-4}
GWQMN	浅地下水产生基流的阈值/mm	748.23	SFTMP	降雪气温阈值/(℃)	−1.17
SOL_BD	表层土壤湿密度/(g/cm³)	0.97	GW_DELAY	地下水延迟时间/d	490.02
CH_K2	主河道水力传导率/(mm/h)	40.66			

计算结果表明, 率定期的模型评价指标为 N_S=0.81、R^2=0.81、P=−1.7%; 验证期的模型评价指标为 N_S=0.74、R^2=0.75、P=5.3%, 这表明 SWAT 模型在葫芦河流域具有很好的适用性。

图 3 为秦安水文站月平均流量模拟结果, 模型在模拟月平均流量的波峰值和波谷值时稍有些偏差, 但在模拟中间值时的效果很好, 且月平均流量的实测曲线和模拟曲线的变化趋势较一致。根据评价指标结果和曲线吻合效果, 可以认为建立的 SWAT 模型能够很好地模拟葫芦河流域的径流。

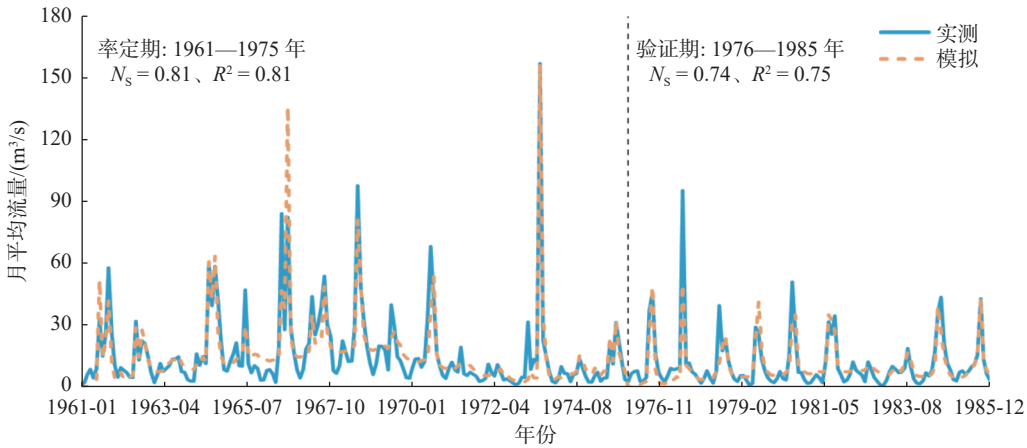


图 3 秦安水文站月平均流量模拟结果

Fig. 3 Results of simulating monthly average flow at Qin'an Hydrological Station

2.3 径流变化定量归因识别

表 3 为气候变化和人类活动对葫芦河流域年平均径流量变化的贡献。可见, 1986—2014 年葫芦河流域年均径流量相较于基准期减少了 2.95 亿 m^3, 占基准期年均径流量的 66.89%, 其中气候变化、土地利用变化和其他人类活动对径流减少的贡献分别为 67.46%、2.03% 和 30.51%。影响Ⅰ期(1986—1999 年)和影响Ⅱ期(2000—2014 年)的流域年均径流量相较于基准期分别减少了 2.74 亿和 3.15 亿 m^3, 分别占基准期年均径流量的 62.13% 和 71.43%。其中, 流域内土地利用变化对径流减少的贡献较低, 分别占 0.36% 和 3.81%; 除土地利用变化外的其他人类活动对径流减少的贡献由 3.65% 增至 52.38%, 这表明 2000 年后流域内的人类活动明显增加; 而气候变化对径流减少的贡献则由 95.99% 减至 43.81%。

表 3 气候变化和人类活动对葫芦河流域年平均径流量的影响

Tab. 3 Influences of climate change and human activities on mean annual runoff in the Hulu River basin

时期		年均径流量实测值/亿m^3	年均径流量模拟值/亿m^3		总减少量/亿m^3	气候变化影响		人类活动影响			
								土地利用影响		其他人类活动影响	
			土地利用不变工况	土地利用改变工况		减少量/亿m^3	比例/%	减少量/亿m^3	比例/%	减少量/亿m^3	比例/%
基准期	1961—1985年	4.41	4.39								
影响期	1986—1999年(Ⅰ期)	1.67	1.78	1.77	2.74	2.63	95.99	0.01	0.36	0.10	3.65
	2000—2014年(Ⅱ期)	1.26	3.03	2.91	3.15	1.38	43.81	0.12	3.81	1.65	52.38
	1986—2014年	1.46	2.42	2.36	2.95	1.99	67.46	0.06	2.03	0.90	30.51

气候变化和人类活动不仅影响径流量, 而且影响径流的季节分配, 图 4 为人类活动和气候变化对两个影响时期径流季节分配的影响。分析可见: 2000—2014 年, 土地利用变化和其他人类活动作用下, 月径流量均呈减少趋势, 对 7—10 月的影响较大; 土地利用变化对 8 月径流量的影响最大, 减少了 145.54 万 m^3; 其他人类活动对 7 月径流量的影响最大, 减少了 2 674.65 万 m^3; 气候变化对径流量的影响分别在 1 月和 12 月表现为增加 302.26 万和 200.13 万 m^3, 在其余月份均表现为减少, 尤其是主汛期 7—9 月的减幅较大, 主要由降水减少和气温升高共同导致。2000—2014 年与 1986—1999 年相比, 土地利用变化和其他人类活动对径流量的影响程度有明显增加趋势, 而气候变化对主汛期 7—9 月径流量的影响程度则是明显减弱。2000—2014 年气候变化对径流量的影响在 1 月和 12 月表现为增加, 其中 1 月气温升高 1.04 ℃、降水增加 1.75 mm; 12 月气温升高 1.28 ℃、降水增加 0.22 mm, 气候变化导致径流增加的主要原因是降水增加[27]。

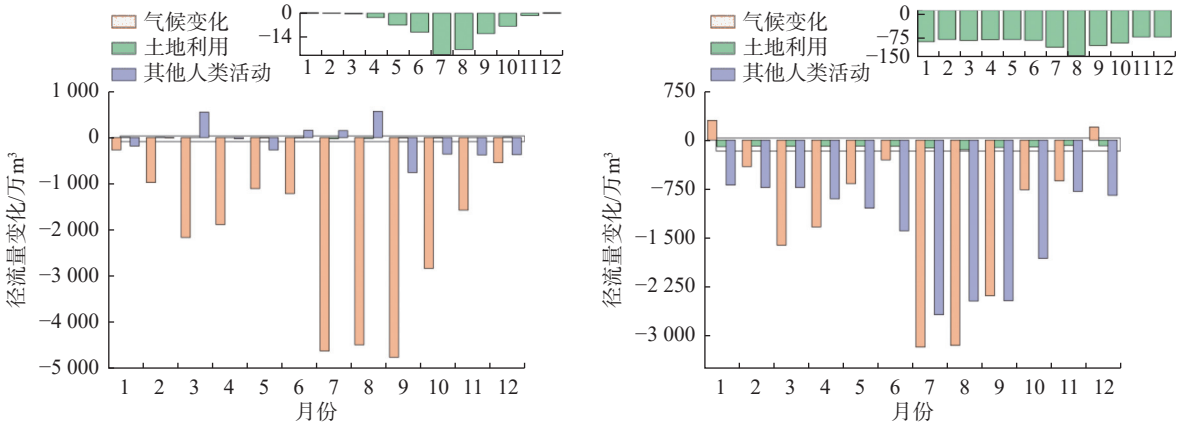


图 4　人类活动和气候变化对葫芦河流域径流量的月度变化

Fig. 4　Variations in monthly runoff in the Hulu River Basin caused by human activities and climate change

3　讨　论

3.1　径流变化归因分析

气候变化对葫芦河流域径流的影响主要由降水减少和气温升高导致[28], 图 5 为葫芦河流域年降水量和年气温的变化趋势及 M-K 突变检验结果。由图 5 可见, 1961—2014 年葫芦河流域年降水量先下降后上升, 整体呈下降趋势, 1996 年之前流域年降水量下降不显著, 1996 年之后年降水量表现为显著减少趋势(p<0.05), 1961—2014 年年降水量为 296.76~714.08 mm; 1961—2014 年葫芦河流域年气温整体表现为明显升高趋势, 1997 年之前流域年气温变化不显著, 1997 年后年气温表现为显著升高趋势(p<0.05), 1961—2014 年年气温为 5.95~8.68 ℃。统计结果表明, 在影响Ⅰ期和Ⅱ期, 流域多年平均降水量较基准期分别减少了 65.80 和 29.68 mm, 多年平均气温较基准期分别升高了 0.53 和 1.11 ℃。流域内降水减少和气温升高势必会导致径流的显著减少, 特别是在影响Ⅰ期, 降水量的大幅度减少是径流减少的主要因素[8]。

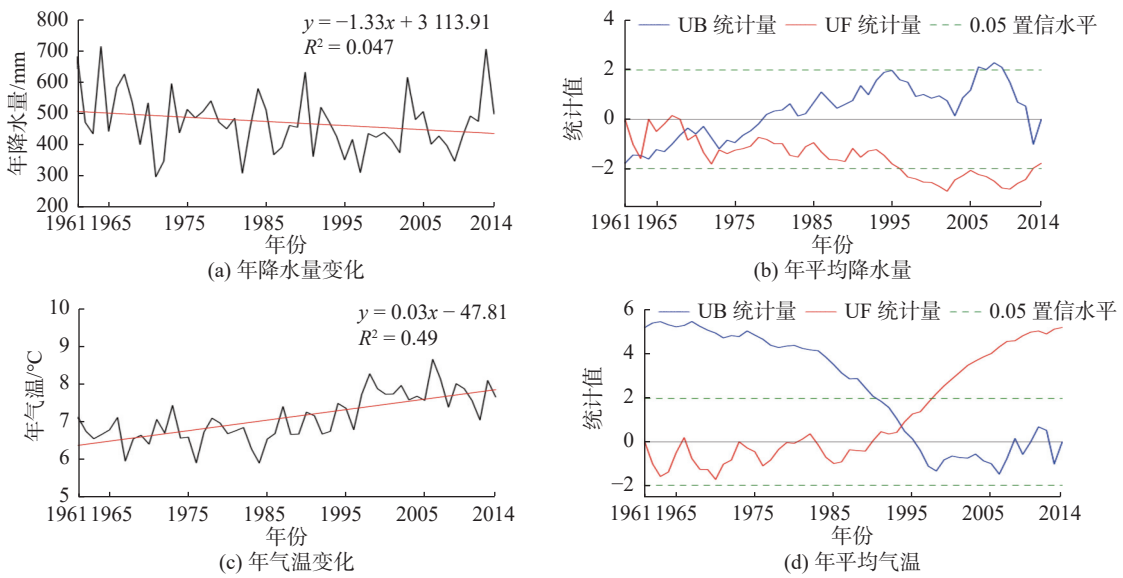


图 5　葫芦河流域年平均降水量及平均气温年际变化趋势和 M-K 检验

Fig. 5　The inter-annual trend of mean annual precipitation and mean annual temperature in the Hulu River Basin and M-K test

土地利用变化会对径流产生一定的影响，土地利用分析结果(表 4)表明，葫芦河流域主要土地利用类型为耕地和草地，两者面积占比之和超过 92%，且 1995 和 2010 年相对于 1980 年这两者变化率都低于 4%。与基准期土地利用相比，流域 1995 年的耕地和林地面积分别增加 136 和 15 km²，而草地和居民用地的面积分别减少 132 和 11 km²；流域 2010 年的耕地、林地和居民用地面积分别增加 72、16 和 20 km²。林地面积的增加是导致流域径流减少的原因之一[11,29]。整体而言，研究时段内土地利用变化不明显，这与土地利用变化贡献率较低的结论相一致。

表 4 葫芦河流域土地利用面积及变化率统计

Tab. 4 Statistical analysis of land use area and rate of change in the Hulu River Basin

土地利用类型	1980年		1995年			2010年		
	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	变化量/km²	面积/km²	占比/%	变化量/km²
耕地	5 324	54.43	5 460	55.82	136	5 396	55.17	72
林地	348	3.56	363	3.71	15	354	3.62	6
草地	3 783	38.67	3 651	37.33	−132	3 672	37.55	−111
水域	83	0.85	77	0.79	−6	80	0.82	−3
居民用地	218	2.23	207	2.12	−11	238	2.43	20
未利用地	26	0.26	22	0.23	−4	40	0.41	14

水资源是支持流域内经济社会发展的重要因素，水库和河道提水工程的修建及运行对河川径流产生直接影响。为了提高生产力、改善农业发展基本条件，葫芦河流域建设了大量的水库、淤地坝等水利工程[30]，这些措施的实施改变了河道水文情势，使得径流大幅度减少。2000 年以后较 2000 年以前，其他人类活动的显著变化包括更多水库(调蓄水库)、灌区(南梁灌区二期工程)和渠道(用于稻田灌溉和抗旱)的建设，使得地表水工程取水量增多；生活用水、工业用水、农业用水和人工生态环境补水相较之前也有明显增多[31]。影响Ⅱ期与影响Ⅰ期相比，居民用地面积增加了 31 km²，这间接说明人类生产和生活用水量的明显增加使得径流减少，人类活动是 II 期径流减少的主要原因。

3.2 不确定性分析

本文采用 SWAT 模型模拟葫芦河流域径流变化，分析气候变化和人类活动对径流变化的影响，由于模型模拟和真实情况会有一定差异，且模型在模拟过程中一个时段只输入了一期的土地利用分布结果，这会给模型模拟径流带来一定的不确定性。此外，模型在计算气候变化对径流的影响时，只输入了基准期的土地利用分布(1980 年)，这也会对径流变化的归因分析造成不确定性。因此，将 1980 年土地利用分布改为 1995 年的，研究不同土地利用分布下影响期相对于基准期气候变化对径流的影响差异。结果表明，1986—1999 年气候变化对径流的减少量由 2.63 亿 m³ 减少至 2.41 亿 m³；2000—2014 年气候变化对径流的减少量由 1.38 亿 m³ 增加至 1.62 亿 m³。这表明模型模拟过程中气候和土地利用的作用并不相互独立。

环境变化背景下，气候变化和人类活动对径流的影响存在着许多不确定性，尤其是在季节尺度上。何玉芬等[9]研究发现气候变化对北大沙河流域夏季径流影响较为显著，而人类活动主要对夏季和冬季径流影响较为明显；魏晓婷等[32]研究发现气候变化对泾河流域的影响只在秋季占据主导因素，而其他季节则主要是人类活动的影响；王国庆等[27]研究发现季节尺度上人类活动是影响岚河流域径流的主要因素，且对四季径流的影响均为减少径流。综上，不同流域之间在季节尺度上的径流变化归因也具有很大的差异性。

4 结 语

1961—2014 年葫芦河流域年径流量先增后减，整体呈下降趋势，变化范围是 0.27 亿~8.50 亿 m³。M-K 突变检验结果表明葫芦河流域径流在 1986 年发生突变且径流量在突变点后显著减少。1986—2014 年葫芦河流域年均径流量相较于基准期减少了 2.95 亿 m³，其中气候变化、土地利用变化和其他人类活动对径流减少的贡献分别为 67.46%、2.03% 和 30.51%。气候变化是影响Ⅰ期(1986—2014 年)径流减少的主要原

因, 其他人类活动和土地利用变化是Ⅱ期(2000—2014 年)径流减少的主要驱动力。

气候变化、土地利用变化和其他人类活动对径流量的影响存在比较明显的月度差异。2000—2014 年, 土地利用变化和其他人类活动作用下, 月径流量均表现为减少, 对 7—10 月的影响较大; 气候变化对径流量的影响在 1 月和 12 月表现为增加 302.26 万和 200.13 万 m^3, 在其余月份均表现为减少, 尤其是主汛期 7—9 月的减幅较大。

参　考　文　献:

[1] 张建云, 王国庆, 金君良, 等. 1956—2018 年中国江河径流演变及其变化特征[J]. 水科学进展, 2020, 31(2): 153-161. (ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, JIN Junliang, et al. Evolution and variation characteristics of the recorded runoff for the major rivers in China during 1956-2018[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(2): 153-161. (in Chinese))

[2] 李峰平, 章光新, 董李勤. 气候变化对水循环与水资源的影响研究综述[J]. 地理科学, 2013, 33(4): 457-464. (LI Fengping, ZHANG Guangxin, DONG Liqin. Studies for impact of climate change on hydrology and water resources[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(4): 457-464. (in Chinese))

[3] 刘晶, 鲍振鑫, 刘翠善, 等. 近 20 年中国水资源及用水量变化规律与成因分析[J]. 水利水运工程学报, 2019(4): 31-41. (LIU Jing, BAO Zhenxin, LIU Cuishan, et al. Change law and cause analysis of water resources and water consumption in China in past 20 years[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(4): 31-41. (in Chinese))

[4] 王晓颖, 宋培兵, 廖卫红, 等. 气候变化和人类活动对白河流域径流变化影响的定量研究[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(4): 50-56. (WANG Xiaoying, SONG Peibing, LIAO Weihong, et al. Quantitative analysis of the influences of climate change and human activities on runoff variations of Baihe River Basin[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2020, 31(4): 50-56. (in Chinese))

[5] 林娴, 陈晓宏, 何艳虎, 等. 气候变化和人类活动对武江流域年径流及最大日流量影响的定量分析[J]. 自然资源学报, 2018, 33(5): 828-839. (LIN Xian, CHEN Xiaohong, HE Yanhu, et al. Quantitative analysis of the impacts of climate change and human activities on annual and maximum daily runoff in the Wujiang River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(5): 828-839. (in Chinese))

[6] 王国庆, 张建云, 刘九夫, 等. 气候变化和人类活动对河川径流影响的定量分析[J]. 中国水利, 2008(2): 55-58. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, LIU Jiufu, et al. Quantitative assessment for climate change and human activities impact on river runoff[J]. China Water Resources, 2008(2): 55-58. (in Chinese))

[7] 王中根, 刘昌明, 左其亭, 等. 基于 DEM 的分布式水文模型构建方法[J]. 地理科学进展, 2002, 21(5): 430-439. (WANG Zhonggen, LIU Changming, ZUO Qiting, et al. Methods of constructing distributed hydrological model based on DEM[J]. Progress in Geography, 2002, 21(5): 430-439. (in Chinese))

[8] 张利茹, 贺永会, 唐跃平, 等. 海河流域径流变化趋势及其归因分析[J]. 水利水运工程学报, 2017(4): 59-66. (ZHANG Liru, HE Yonghui, TANG Yueping, et al. Analysis of runoff change trend and its attribution in Haihe River Basin[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(4): 59-66. (in Chinese))

[9] 何玉芬, 杨汉波, 唐莉华, 等. 北大沙河流域径流变化归因分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 95-101. (HE Yufen, YANG Hanbo, TANG Lihua, et al. Attribution analysis of runoff change in the Beidasha River Basin[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 95-101. (in Chinese))

[10] 王金凤, 武桃丽. 漳河上游径流变化特征及其归因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(10): 165-171. (WANG Jinfeng, WU Taoli. Analysis on runoff variation characteristics and its attribution in the upper reaches of Zhanghe River Basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(10): 165-171. (in Chinese))

[11] 张利平, 李凌程, 夏军, 等. 气候波动和人类活动对滦河流域径流变化的定量影响分析[J]. 自然资源学报, 2015, 30(4): 664-672. (ZHANG Liping, LI Lingcheng, XIA Jun, et al. Quantitative assessment of the impact of climate variability and human activities on runoff change in the Luanhe River catchment[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(4): 664-672. (in Chinese))

[12] 刘剑宇, 张强, 邓晓宇, 等. 气候变化和人类活动对鄱阳湖流域径流过程影响的定量分析[J]. 湖泊科学, 2016, 28(2): 432-443. (LIU Jianyu, ZHANG Qiang, DENG Xiaoyu, et al. Quantitative analysis the influences of climate change and human activities on hydrological processes in Poyang Basin[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(2): 432-443. (in Chinese))

[13] XIN Z H, LI Y, ZHANG L, et al. Quantifying the relative contribution of climate and human impacts on seasonal streamflow[J]. Journal of Hydrology, 2019, 574: 936-945.
[14] HE Y F, YANG H B, LIU Z W, et al. A framework for attributing runoff changes based on a monthly water balance model: An assessment across China[J]. Journal of Hydrology, 2022, 615: 128606.
[15] 岳思羽, 李怀恩, 赵丽. 气候和土地利用变化对渭河流域水资源短缺的影响[J]. 水土保持研究, 2021, 28(5): 95-101. (YUE Siyu, LI Huaien, ZHAO Li. Impact of climate and land use changes on water scarcity in the Wei River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(5): 95-101. (in Chinese))
[16] 韩群柱, 冯起, 陈桂萍. 渭河流域基于水利供水网络结构的水资源配置模式研究[J]. 干旱区地理, 2016, 39(4): 747-753. (HAN Qunzhu, FENG Qi, CHEN Guiping. Water resources allocation model in Weihe River Basin based on the structure of water supply network[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(4): 747-753. (in Chinese))
[17] LIU N, JIANG W L, HUANG L J, et al. Evolution of sustainable water resource utilization in Hunan Province, China[J]. Water, 2022, 14(16): 2477.
[18] 杨永春, 穆焱杰, 张薇. 黄河流域高质量发展的基本条件与核心策略[J]. 资源科学, 2020, 42(3): 409-423. (YANG Yongchun, MU Yanjie, ZHANG Wei. Basic conditions and core strategies of high-quality development in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2020, 42(3): 409-423. (in Chinese))
[19] 魏国孝, 杨佳丽, 徐涛, 等. 甘肃葫芦河流域径流变化的 SWAT 模型模拟[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2009, 45(6): 1-7. (WEI Guoxiao, YANG Jiali, XU Tao, et al. SWAT model simulation of runoff variation of Hulu River Basin in Gansu Province[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2009, 45(6): 1-7. (in Chinese))
[20] DASH S S, SAHOO B, RAGHUWANSHI N S. How reliable are the evapotranspiration estimates by Soil and Water Assessment Tool (SWAT) and Variable Infiltration Capacity (VIC) models for catchment-scale drought assessment and irrigation planning?[J]. Journal of Hydrology, 2021, 592: 125838.
[21] 王一然, 丁文峰, 张冠华. 基于 SWAT 模型的丹江流域土地利用变化对径流影响研究[J]. 水土保持研究, 2022, 29(4): 62-67, 74. (WANG Yiran, DING Wenfeng, ZHANG Guanhua. Study on the impact of land use change on runoff in Danjiang watershed based on SWAT model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(4): 62-67, 74. (in Chinese))
[22] 汪飞, 洪林, 马田遥, 等. 基于 SWAT 模型的气候变化条件下诺敏河流域径流变化研究[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 67-77. (WANG Fei, HONG Lin, MA Tianyao, et al. Study on runoff change of Nuomin River Basin under climate change conditions based on SWAT model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 67-77. (in Chinese))
[23] 郭伟, 陈兴伟, 林炳青. SWAT 模型参数对土地利用变化的响应及其对不同时间尺度径流模拟的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(16): 6373-6383. (GUO Wei, CHEN Xingwei, LIN Bingqing. Response of SWAT model parameters to land use change and its effects on the simulation of runoff with different time scales[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(16): 6373-6383. (in Chinese))
[24] 祖拜代·木依布拉, 师庆东, 普拉提·莫合塔尔, 等. 基于 SWAT 模型的乌鲁木齐河上游土地利用和气候变化对径流的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(14): 5149-5157. (ZUBAIDA·Muyibul, SHI Qingdong, POLAT·Muhtar, et al. Land use and climate change effects on runoff in the upper Urumqi River watershed: a SWAT model based analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(14): 5149-5157. (in Chinese))
[25] 刘酌希, 陈鑫, 管晓祥, 等. 变化环境下洮河流域径流变化归因[J]. 水土保持研究, 2020, 27(5): 87-92, 100. (LIU Zhuoxi, CHEN Xin, GUAN Xiaoxiang, et al. Attribution of runoff change in the Taohe River Basin under a changing environment[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(5): 87-92, 100. (in Chinese))
[26] 胡琦, 马雪晴, 胡莉婷, 等. Matlab 在气象专业教学中的应用: 气象要素的 M-K 检验突变分析[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(12): 48-51, 107. (HU Qi, MA Xueqing, HU Liting, et al. Application of Matlab in meteorological teaching: M-K test for the abrupt change analysis of meteorological elements[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2019, 38(12): 48-51, 107. (in Chinese))
[27] 王国庆, 张建云, 鲍振鑫, 等. 人类活动和气候变化对岚河流域河川径流的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(6): 113-118. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, BAO Zhenxin, et al. Change in runoff within the Lan River Basin due to climate change and human activities[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(6): 113-118. (in Chinese))
[28] 魏宣, 王宁, 周明通, 等. 气候变化和人类活动对克里雅河径流变化影响定量研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(8): 80-86. (WEI Xuan, WANG Ning, ZHOU Mingtong, et al. Combined impact of climate change and human activities on runoff in the Kriya River[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(8): 80-86. (in Chinese))

[29] 余扬波, 唐国平, 牛香豫, 等. 土地利用和气候变化对流溪河水库流域径流的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 32-39, 48. (YU Yangbo, TANG Guoping, NIU Xiangyu, et al. Effect of land use and climate change on runoff in Liuxi River reservoir basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 32-39, 48. (in Chinese))

[30] 邓刚, 张富, 马瑞, 等. 以坡耕地梯田化促进农业产业化发展对策[J]. 中国水土保持, 2022(3): 5-8. (DENG Gang, ZHANG Fu, MA Rui, et al. Countermeasures for promoting the development of agricultural industrialization by terracing sloping farmland[J]. Soil and Water Conservation in China, 2022(3): 5-8. (in Chinese))

[31] 王学俭. 甘肃省庆阳市葫芦河流域水资源配置研究[J]. 水利发展研究, 2013, 13(8): 70-72. (WANG Xuejian. Study on water resources allocation of Hulu River Basin in Qingyang City, Gansu Province[J]. Water Resources Development Research, 2013, 13(8): 70-72. (in Chinese))

[32] 魏晓婷, 黄生志, 黄强, 等. 定量分解气候变化与人类活动对季节径流变异的贡献率[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 182-189. (WEI Xiaoting, HUANG Shengzhi, HUANG Qiang, et al. Quantitative decomposition of contributions of climate change and human activities to seasonal runoff variability[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(6): 182-189. (in Chinese))

The effects of climate change and human actions on runoff and its seasonal variation

GUO Xinyi[1, 2, 3], JIA Yufan[2, 3, 4], FAN Lili[1], WANG Guoqing[1, 2, 3]

(1. *The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention*, *Nanjing Hydraulic Research Institute*, *Nanjing* 210029, *China*; 2. *Yangtze Institute for Conservation and Development*, *Nanjing* 210098, *China*; 3. *Cooperative Innovation Center for Water Safety & Hydro Science*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*; 4. *College of Hydrology and Water Resources*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*)

Abstract: The impacts of climate change and human activities on basin runoff are crucial for effective basin management. This study employs the M-K mutation test to determine the baseline and impact periods of runoff in the Hulu River basin. Based on simulation results from the SWAT model, the contributions of climate change, land use change, and other human activities to runoff changes in the basin are quantified. The findings indicate that: (1) The annual runoff in the Hulu River basin exhibited an initial increase followed by a decrease from 1961 to 2014, displaying an overall declining trend, with a notable change occurring in 1986. (2) The SWAT model effectively reproduces the natural runoff process in the Hulu River basin, meeting the criteria of Nash Sutcliffe efficient coefficient (N_S) > 0.74 and coefficient of determination (R^2) > 0.75 for both the calibration and validation periods. (3) The average annual runoff in the Hulu River basin during 1986-2014 decreased by 295 million m^3 compared to the base period (1961-1985). Climate change, land use change, and other human activities contributed 67%, 2%, and 31%, respectively. Within impact periods I (1986-1999) and II (2000-2014), climate change accounted for 96% and 44% of the runoff reduction, while other human activities contributed 3% and 52%, and land use changes contributed 1% and 4%, respectively. (4) During 2000-2014, both land use change and other human activities led to a decrease in monthly runoff. Climate change influenced runoff with an increase in January and December and a decrease in the remaining months. Overall, climate change was the primary factor influencing runoff in the Hulu River basin before 2000, whereas human activities took precedence after 2000. These findings provide valuable insights for optimizing land use patterns and promoting the sustainable utilization of water resources.

Key words: watershed management; runoff changes; climate change; human activities; SWAT model; attribution analysis; Hulu River Basin