

气候变化及生态建设措施对宁夏典型入黄流域径流变化影响

于坤霞^{1,2}, 李雪^{1,2}, 徐丙翔^{1,3}, 李占斌^{1,2},
李鹏^{1,2}, 张国军⁴, 张晓明⁵, 赵阳⁵, 马文涛⁴

(1.西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室,西安 710000;

2.西安理工大学旱区生态水文与灾害防治国家林业和草原局重点实验室,西安 710048;3.安徽省交通勘察设计院有限公司,合肥 230000;4.宁夏回族自治区水土保持监测总站,银川 750000;5.中国水利水电科学研究院,北京 100000)

摘要: 为分析气候变化及植被和淤地坝等生态建设措施对径流变化的影响,选取宁夏典型入黄流域清水河和苦水河为研究对象,采用 Pettitt 突变方法分析研究流域气象水文和生态建设措施等要素的变异点,基于 Budyko 理论,通过建立水热耦合控制参数与生态建设措施的多元线性回归方程,构建耦合生态建设措施下的降水—径流模型,并对模型进行适用性评估,采用弹性系数法,量化不同生态建设措施对径流变化的贡献率。结果表明:研究流域径流均呈减小趋势,且年径流突变均发生在 2000 年;水热耦合控制参数与 NDVI 和淤地坝指数呈显著的正相关关系,引入 NDVI 和淤地坝指数构建的降水—径流模型模拟值接近实测值;清水河流域生态建设措施实施对径流减少的贡献率高达 78.25%,其中,植被和淤地坝对径流减少贡献率分别为 23.11%,46.50%,生态建设措施对径流的影响远大于气候变化对径流产生的影响。苦水河流域降水对径流减少贡献率可达 47.30%,生态建设措施对苦水河径流减少贡献率为 59.57%,植被和淤地坝贡献率分别为 18.57%,13.96%,其他生态建设措施对径流减少贡献率为 27.04%。生态建设是引起宁夏入黄流域径流变化的主要驱动因素。研究结果可为宁夏生态建设优化布局提供理论支撑。

关键词: 径流变化;生态建设措施;Budyko 理论;水热耦合控制参数;贡献率

中图分类号:P339.0

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2023)06-0042-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.06.006

Impacts of Climate Change and Ecological Construction Measures on Runoff Changes in Yellow River Tributaries of Ningxia Section

YU Kunxia^{1,2}, LI Xue^{1,2}, XU Bingxiang^{1,3}, LI Zhanbin^{1,2}, LI Peng^{1,2},
ZHANG Guojun⁴, ZHANG Xiaoming⁵, ZHAO Yang⁵, MA Wentao⁴

(1.State Key Laboratory of Ecological Water Resources in Northwest Arid Zone, Xi'an University of Technology, Xi'an 710000; 2.Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048; 3.Anhui Provincial Transportation Survey and Design Institute, Hefei 230000; 4.Ningxia Soil and Conservancy Water Surveillance Station, Yinchuan 750000; 5.China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100000)

Abstract: In order to analyze the impact of climate change and ecological construction measures such as vegetation and silt dams on runoff changes, the Qingshui River and Kushui River, typical watersheds into the Yellow River in Ningxia, were selected as the research objects. The Pettitt mutation method were used to detect the change points of meteorological, hydrological, and ecological construction measure series, and the multivariate linear regression equations between the land surface parameter and ecological construction measures were constructed, rainfall runoff model coupled ecological construction measures was derived based on the Budyko theory, the applicability of the model was evaluated, and the elastic coefficient method was used to quantify the contribution rate of different ecological construction measures to runoff changes. The results indicated that the runoffs in the study watersheds showed decreasing trends, and the change points of

收稿日期:2023-05-26

资助项目:国家自然科学基金面上项目(52079104);宁夏水利科技项目(SBZZ-J-2021-12, SBZZ-J-2021-13);陕西省重点研发计划项目(2023-ZDLSF-60)

第一作者:于坤霞(1989—)女,博士,副教授,主要从事变化环境下流域水沙过程分析与模拟研究。E-mail:yukunxia@126.com

通信作者:于坤霞(1989—)女,博士,副教授,主要从事变化环境下流域水沙过程分析与模拟研究。E-mail:yukunxia@126.com

annual runoff occurred around 2000. The land surface parameters had significant positive correlations with the NDVI and silt dam index, and the simulated values from the rainfall-runoff model constructed by the introduction of the NDVI and the silt dam index are close to the observed values. The contribution rate of ecological construction measures to the reduction of runoff was as high as 78.5% in the Qingshui River basin, and vegetation and silt dams contributed 23.11% and 46.50%, respectively. The impact of ecological construction measures on runoff was much greater than that of climate change. The contribution rate of rainfall to runoff reduction in the Kushui River Basin can reach 47.30%, and the contribution rate of ecological construction measures was 59.57%, with vegetation and silt dams contributing 18.57% and 13.96% respectively, while the contribution rate of other ecological construction measures to the reduction of runoff was 27.04%. Ecological construction was the main driving factor causing changes in runoff in the Ningxia Yellow River Basin. The research results can provide theoretical support for optimizing the layout of ecological construction in Ningxia.

Keywords: runoff changes; ecological construction measures; Budyko theory; land surface parameter; contribution rate

径流是水文循环的核心环节,是社会经济与生态可持续发展的重要基础^[1]。目前,径流变化分析常用的主要是水文模型和 Budyko 理论^[2-3],水文模型对数据精度要求较高,且受地形影响较大,难以大规模推广应用^[4],而 Budyko 理论因其计算简单且结果准确,被广泛应用于水文流域研究中^[5]。杨大文等^[6]基于 Budyko 理论对黄河流域 38 个典型流域径流变化进行归因分析发现,径流的气候弹性和下垫面弹性具有一致性,黄土高原水文过程对气候和下垫面变化更敏感;赵香桂等^[7]应用 Budyko 理论对我国干旱与湿润区水热耦合参数进行归因分析发现,流域的水热耦合参数均呈显著上升趋势,不同气候区水热耦合参数变化的主导因子不同。

宁夏地处西北内陆,水资源匮乏,生态环境脆弱,是全国水土流失最严重省区之一^[8]。近年来,宁夏实施一系列如退耕还林还草、修建淤地坝等生态建设措施^[9],严重影响流域下垫面格局,改变流域产汇流过程,尤其是退耕还林(还草)工程实施,发挥改善生态环境的积极作用,极大地改变土地利用、植被覆盖、地表径流及土壤侵蚀状况^[10]。已有大量研究^[11-12]表明,人类活动是引起径流变化的主导因素。但关于人类活动对径流影响的研究,主要以植被恢复对流域径流变化产生的影响为主,少有分析其他生态建设措施对径流变化的影响。事实上,黄土高原为有效遏制水土流失,在实施退耕还林还草等植被恢复措施的同时修建大量淤地坝,根据《第一次全国水利普查水土保持情况公报》^[13],黄土高原共有淤地坝 58 446 座,淤地面积 927.57 km²。淤地坝的修建改变流域下垫面条件,影响流域径流过程,单纯地研究植被对径流变化的影响无法精确地量化不同人类活动对黄土高原流域径流变化的影响^[14]。基于此,选取淤地坝和植

被作为生态建设措施因子,采用 Budyko 理论通过构建耦合生态建设措施的年降水—径流模型,基于弹性系数法,量化淤地坝和植被不同生态建设措施对径流变化的影响,阐明生态建设措施对宁夏典型入黄流域水热耦合的影响,以期成果可以为宁夏生态建设优化布局提供理论支撑。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

宁夏主要河流有黄河干流及其支流。境内黄河及其各级支流中,流域面积>10 000 km²仅黄河和清水河 2 条,面积>1 000 km²的有 15 条^[15]。选取清水河和苦水河 2 条最大的典型入黄支流作为研究对象(图 1)。其中,清水河是宁夏境内汇入黄河的最大支流,发源于固原市原州区开城乡黑刺沟脑,集水面积 14 481 km²;河长 320 km,左岸支流有东至河、中河、苋麻河、西河、金鸡儿沟、长沙河 6 条;右岸有双井子沟、折死沟 2 条。流经原州区、西吉、同心、海原、中卫、中宁 6 县(市),由中宁县泉眼山汇入黄河;苦水河是宁夏入黄的第二大支流,发源于甘肃省环县沙坡子沟脑,集水面积 5 218 km²。由甘肃环县进入宁夏,经盐池、同心、灵武、利通区四县(市),由灵武市新华桥汇入黄河。

1.2 数据来源

收集清水河和苦水河 2 个典型入黄支流水文站径流、气象资料、NDVI 植被数据和淤地坝资料。其中,清水河上游控制站为韩府湾站,流域集水面积为 4 935 km²,研究序列为 1982—2018 年;苦水河控制站为郭家桥站,流域集水面积为 5 216 km²,研究序列为 1989—2018 年。对于缺失年份水文站资料根据邻近站资料插补延展。收集水文站资料年限达到 30 年以上,具有代表性。由于资料限制,对清水河主要

研究韩府湾站控制的上游河段。1982—2018 年水文站径流资料来自水文年鉴(中国黄河水利委员会水文局 www.hwsbj.gov.cn);1982—2018 年气象数据来自国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>);

1982—2018 年逐年 NDVI 植被数据,来自国家地球系统科学数据中心(<http://loess.geodata.cn/>),分辨率为 5 km;宁夏淤地坝资料来自《宁夏淤地坝运行风险研究》^[16]。

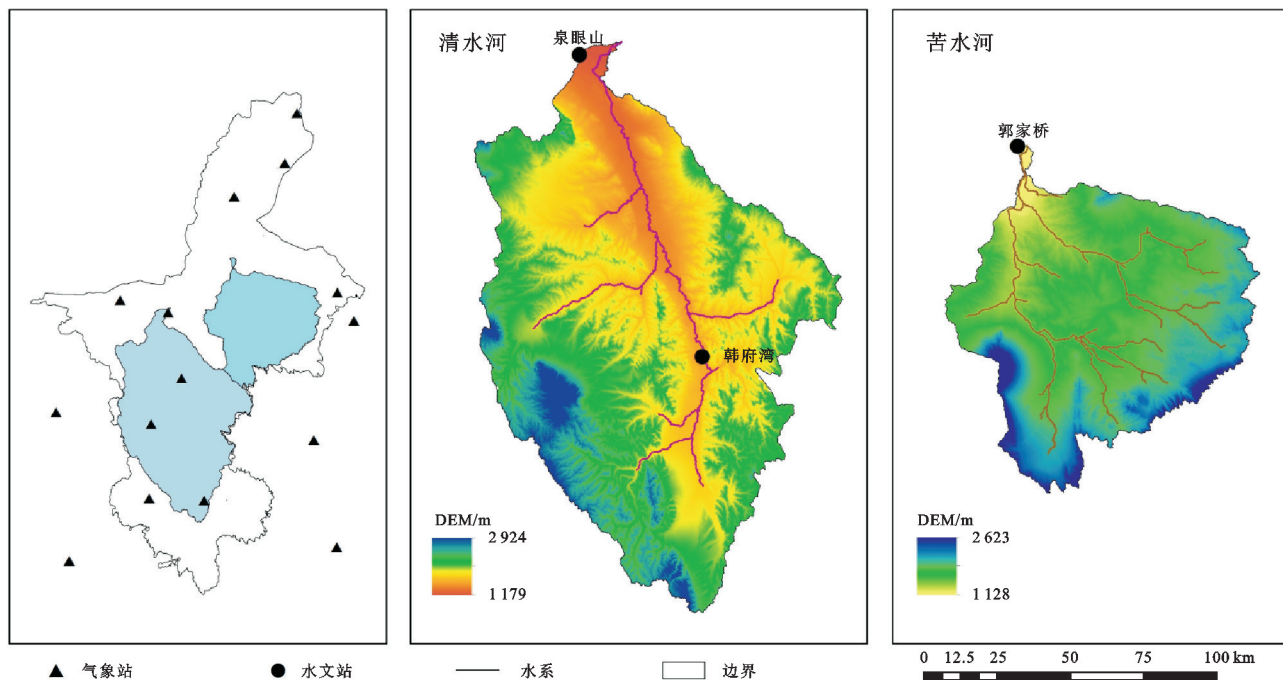


图 1 研究流域概况

为减少流域蓄水量变化对水量平衡的影响,利用滑动平均法计算要素多年平均值,将一定长度时间窗内各要素平均值作为时间窗中心点值^[17],根据研究时段长选取 11 年为时间窗口长度。为验证模型的适用性,以 2008 年为分界,划分率定期和验证期。考虑到大规模生态建设措施在 2000 年以后实施,因此,以 2000 年为界,划分基准期和变化期,研究变化期气候变化和生态建设措施对径流的影响。因此进行水热耦合控制参数拟合时,清水河上游选定率定期为 1987—2008 年,验证期为 2009—2013 年,苦水河选定率定期为 1994—2008 年,验证期为 2009—2013 年;在进行贡献率分析时,清水河上游选定基准期为 1987—2000 年,变化期为 2001—2013 年,苦水河选定基准期为 1994—2000 年,变化期为 2001—2013 年。由于收集的 2 个流域水文站资料及生态建设措施数据时间序列长度不一致,因此,研究时对 2 个流域的数据序列起止年限做不同的划分。

1.3 研究方法

1.3.1 Budyko 理论 Budyko 理论以流域水量平衡方程为基础,水量平衡方程为:

$$R = P - ET - \Delta S \quad (1)$$

式中: R 为流域多年平均径流深(mm); P 为流域多年平均降水量(mm); ET 为多年平均实际蒸散发(mm); ΔS 为流域蓄水量变化(mm),在多年时间尺

度下流域蓄水量可忽略不计,即 $\Delta S \approx 0$ 。

在多年时间尺度下,Budyko^[18]认为流域实际蒸散量同时受水量和热量条件的影响,进而提出水热耦合平衡理论,其中,傅抱璞^[19]公式可较好地反映流域内的水热耦合状态,其公式为:

$$\frac{ET}{P} = 1 + \frac{E_0}{P} - \left[1 + \left(\frac{E_0}{P} \right)^\omega \right] \frac{1}{\omega} \quad (2)$$

式中: ω 表示 Budyko 框架下的流域水热耦合控制参数; E_0 为潜在蒸散发量(mm),采用的是世界粮农组织(FAO)推荐的修正 Penman-Monteith 方法^[20]。

1.3.2 生态建设措施指数计算 选取宁夏境内多年植被变化及淤地坝数量作为生态建设措施,在考虑植被变化时,选取表征植被变化的 NDVI 指数,为直观体现淤地坝变化对径流变化产生的影响,引入淤地坝指数(RI),淤地坝指数是反映淤地坝对流域水文过程影响的无量纲指标,计算公式为:

$$RI = \sum_{i=1}^n \left(\frac{A_i}{A_t} \right) \cdot \left(\frac{V_i}{Q} \right) \quad (3)$$

式中: n 为某水文站控制面积内淤地坝的总数(个); A_i 为淤地坝控制面积(km^2); A_t 为水文站控制面积(km^2); V_i 为淤地坝的总库容(m^3); $\bar{Q}$ 为水文站的多年平均径流量(m^3)。

1.3.3 模型精度评估 选择 NSE 和 R^2 分析评价模型模拟的好坏程度,选择 MAE 和 RMSE 评价模型

模拟值和实测值之间的接近程度,因为率定期时间序列较短,对 NSE 和 R^2 的计算结果影响较大,因此,验证期只考虑 MAE 和 RMSE 来评判模型模拟结果。 R^2 取值范围区间通常为 $[0,1]$,NSE 的取值范围区间通常 $(-\infty,1)$,评价指标结果值越大代表模型模拟得越好, >0.6 为可接受;平均绝对误差 MAE 和均方根误差 RMSE 的取值范围均为正值,并带有和实际值一样的量纲。其值越接近 0,则表示模型模拟的效果越好,2 个评价指标 <10 为可接受^[21]。

1.3.4 基于弹性系数法流域径流变化贡献率计算
弹性系数法可有效估计径流的变化,在水文学科中常被用来人类活动因子的反应。Schaake^[22] 首先提出径流对降水的弹性系数,定义为径流的变化率对降水的变化率的比值。Sankarasubramanian 等^[23] 在其基础上又提出径流弹性系数,定义为径流变化率与某一气候变化或人类活动因子的变化率之比,弹性系数表述某一影响因子变化对径流变化的影响作用:

$$\epsilon_{xi} = \frac{\partial R}{\partial x_i} \times \frac{x_i}{R}$$

(4)

式中: ϵ_{xi} 为径流 R 对某一特定因素 x_i 的弹性系数。
假设流域基准期多年平均径流深为 R_1 ,变化期内多年平均径流深为 R_2 ,则从基准期到变化期的实际径流变化量为 ΔR ,则可表示为:

$$\Delta R = R_2 - R_1$$

(5)

不同影响因子引起的径流变化可通过径流对其的偏导数与其变化的乘积来估计,具体计算公式为:

$$dR' = \sum \frac{\partial R}{\partial x_i} \times dx_i = \sum dR_{xi}$$

(6)

式中: dR' 为径流变化的估值; dx_i 为某因素的变化量; dR_{xi} 为由该因子引起的径流变化量估计值。计算公式为:

$$dR_{xi} = \epsilon_{xi} \frac{R}{x_i} dx_i$$

(7)

每个影响因子对径流变化的贡献率为:
$$C_{xi} = \frac{dR_{xi}}{dR'} \times 100\%$$

式中: C_{xi} 为某因子对径流变化的贡献率。

2 结果与分析

2.1 影响因子和水热耦合控制参数的演变规律分析

根据泰森多边形法以求得各流域降水量和潜在蒸散发量,再分别计算表征植被和淤地坝变化的 NDVI 和淤地坝指数,绘制研究时段内宁夏典型入黄流域的气候变化和生态建设措施的年际变化。

在研究时段内,清水河上游和苦水河流域降水和潜在蒸散发量均呈现波动变化,但整体变化幅度较小,清水河上游多年平均降水量为 400 mm,苦水河

降水量小于清水河上游,多年平均降水量为 260 mm;清水河上游和苦水河多年平均潜在蒸散发量分别为 963,1 150 mm(图 2a、图 3a);清水河上游径流在 1995 年达到最大值后迅速下降,苦水河径流在 1996 年和 2002 年 2 次出现最大值,并在 2002 年达到峰值后迅速下降,2 个流域径流在研究时段内变化幅度较大,呈现明显下降趋势(图 2b、图 3b)。清水河上游生态建设措施因子在研究时段内均呈现显著上升趋势,特别是在 2000 年以后,得益于 2000 年后宁夏境内大规模开始生态建设工程,退耕还林还草,修建淤地坝,NDVI 指数和淤地坝指数也相应随之增大,2015 年后随着宁夏淤地坝建设工程逐渐停止,流域淤地坝指数也趋于稳定(图 2c、图 3c)。

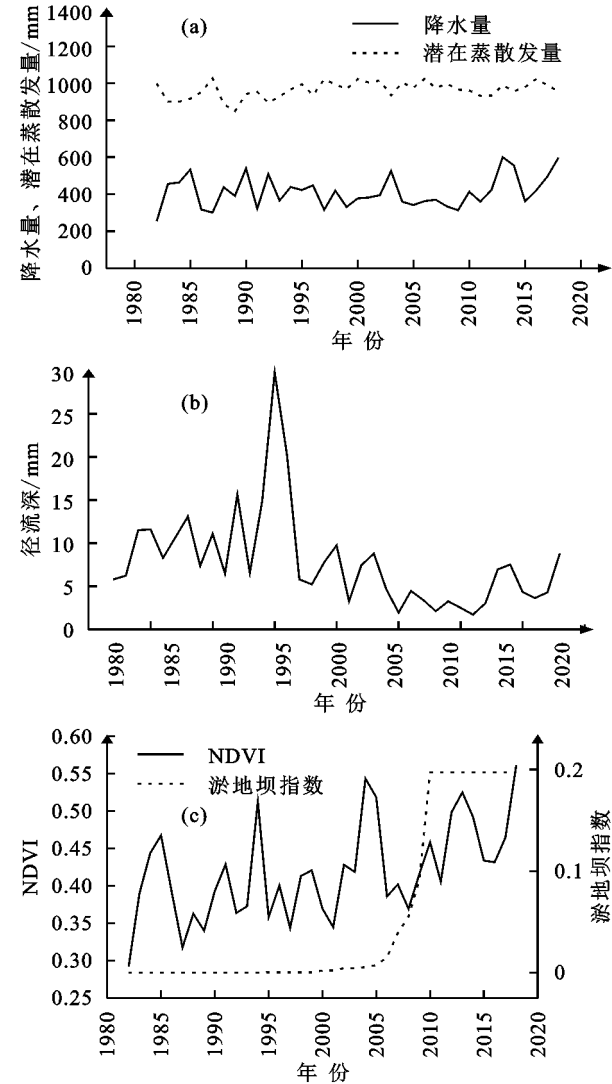


图 2 清水河上游气候及生态建设措施年际变化

采用 Pettitt 突变检验法对宁夏典型入黄流域清水河上游控制站韩府湾站、苦水河的郭家桥站水文序列进行趋势突变分析^[24]。清水河、苦水河降水序列在 5% 显著性水平下没有发生突变,清水河流域潜在蒸散发在 5% 显著性水平下发生显著突变,突变年份分别为 1993 年,苦水河流域潜在蒸散发在研究时段

内未发生显著性突变,清水河及苦水河年径流均发生显著突变($p < 0.05$),突变年份分别为 2000 年和 2002 年(表 1)。

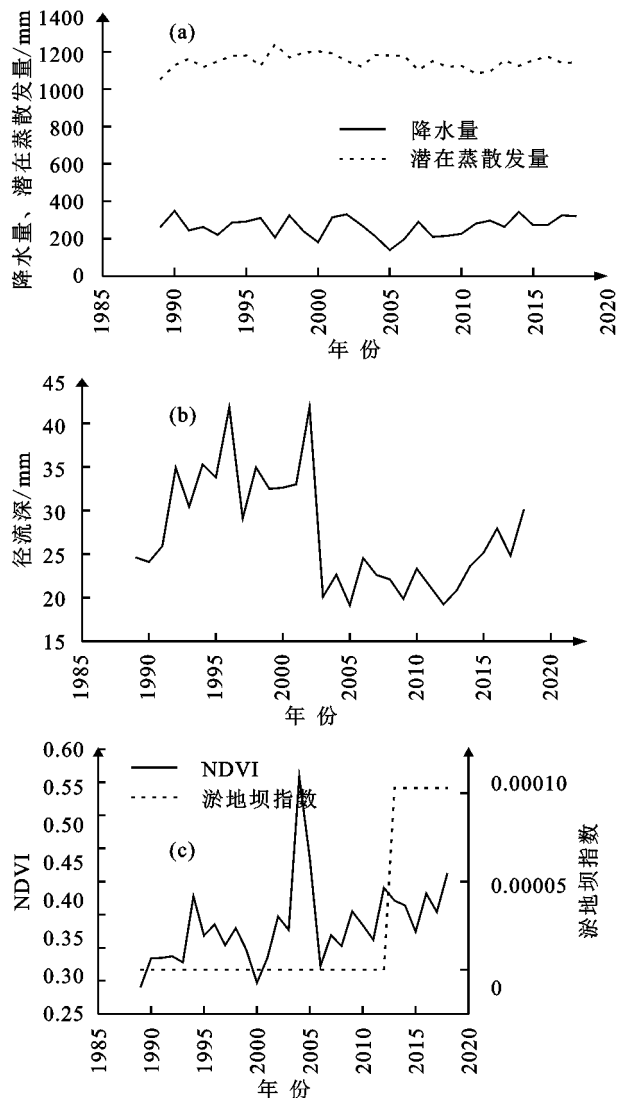


图 3 苦水河气候及生态建设措施年际变化

表 1 宁夏典型入黄流域水文站气象水文序列突变检验结果

水文站	年降水			年潜在蒸散发			年径流		
	U	P_{pt}	突变年份	U	P_{pt}	突变年份	U	P_{pt}	突变年份
韩府湾	126	0.321	—	192	*	1993	266	**	2000
郭家桥	84	0.439	—	116	0.111	—	200	**	2002

注: U 为 pettitt 突变点检验的统计量; P_{pt} 为 pettitt 突变点检验概率; *和 ** 分别表示 $p < 0.05$ 、 $p < 0.01$ 。下同。

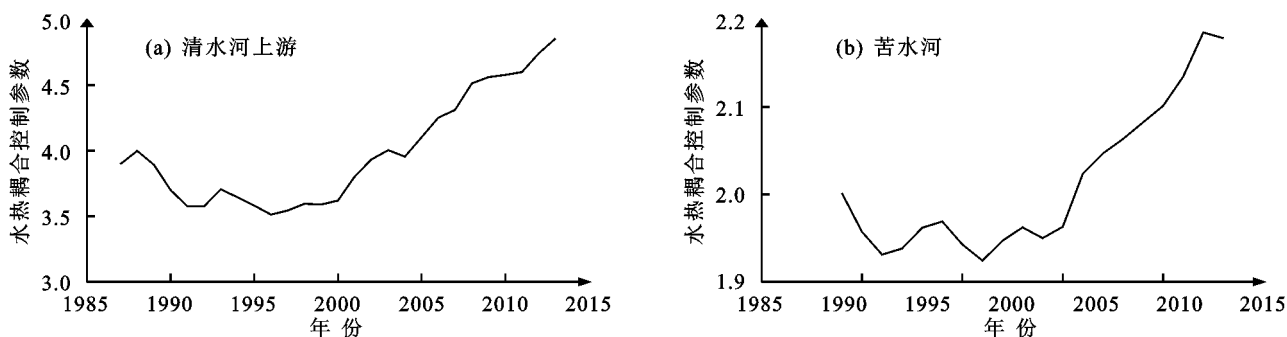


图 4 流域水热耦合控制参数的动态变化

综上所述,宁夏典型入黄流域中清水河上游及苦水河多年径流变化均呈显著减小趋势,且年径流突变基本都发生在 2000 年左右,与宁夏 2000 年后开始大规模实施生态建设措施时间节点吻合,大规模生态建设措施如淤地坝、退耕还林等的施行对流域径流产生显著的影响。

基于水量平衡方程和傅抱璞公式,将潜在蒸散发、降水与径流深以 11 年为滑动窗口带入公式(2),分别估算清水河上游和苦水河时变水热耦合参数(ω)(图 4)。

清水河上游流域水热耦合控制参数(ω)为 3.51~4.86,参数(ω)在 1985—1996 年呈减小趋势,在 1997—2013 年呈增长趋势,增长速率为 0.02/a(图 4a)。苦水河流域控制参数(ω)明显小于清水河流域,为 1.92~2.19,呈先减小后增大变化趋势,在 1994—2001 年呈现波动减小趋势,在 2002—2013 年呈增长趋势,增长速率为 0.01/a(图 4b),结合流域生态建设措施年际变化可知,流域水热耦合控制参数随 NDVI 和淤地坝指数的变化而变化。

为进一步探究流域水热耦合控制参数(ω)与生态建设措施影响因子的相关性,对清水河上游及苦水河流域水热耦合控制参数与 NDVI 与淤地坝指数进行相关性分析,并采用 T 检验检测显著性水平(表 2),流域水热耦合控制参数与苦水河、清水河上游流域 NDVI 指数的相关性系数分别为 0.515、0.878,流域水热耦合控制参数和淤地坝指数的相关性系数分别为 0.916、0.942,且全部通过 5% 显著性水平的 T 检验。淤地坝指数和 NDVI 都和流域水热耦合控制参数有较好的正相关关系,即淤地坝指数和 NDVI 增加,流域水热耦合控制参数也增加,清水河上游流域这种正相关关系比苦水河流域的相关性好。

研究流域	NDVI		RI	
	相关系数	T 值	相关系数	T 值
清水河上游	0.878***	9.186	0.942***	14.009
苦水河	0.515*	2.548	0.916***	9.707

注: T 值表示 T 检验统计量; *** 表示 $p < 0.001$ 。

2.2 水热耦合控制参数拟合及精度评估

为明确生态建设措施与水热耦合控制参数的关系,选取 NDVI 和淤地坝指数为自变量,对水热耦合

控制参数(ω)进行逐步回归分析,清水河上游和苦水河多元线性回归模型分别为 $\omega = 0.846 + 1.173 \times \text{NDVI} + 10.609 \times \text{RI}$ 和 $\omega = 0.553 + 0.437 \times \text{NDVI} + 1922.931 \times \text{RI}$, R^2 分别为 0.87 和 0.85。根据清水河上游和苦水河流域多元回归线性模型分别计算各个模型的年流域水热耦合控制参数的多年平均值,将流域水热耦合控制参数值带入基于 Budyko 框架下的傅抱璞公式,计算得到径流模拟值,模拟值与实测值对比见图 5。

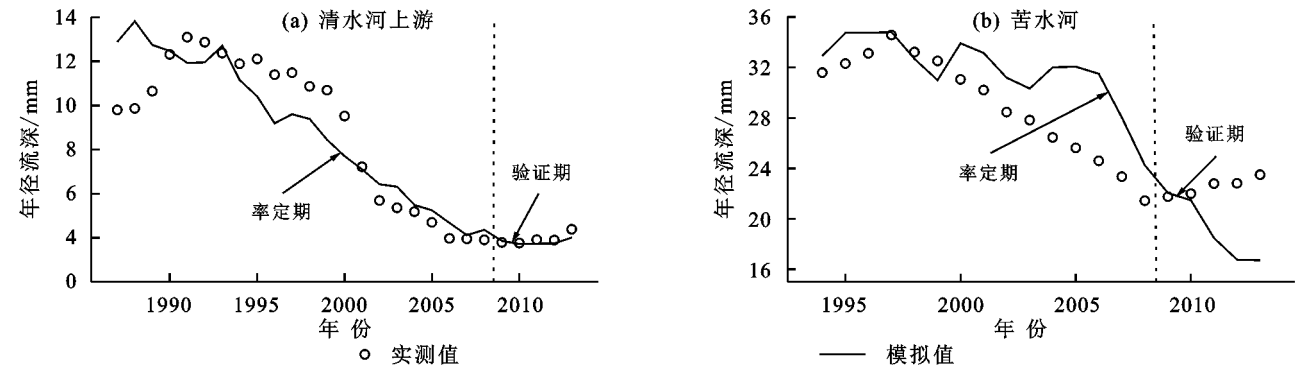


图 5 流域径流的模拟值和实测值对比

验证期和率定期模拟评价指标结果分别见表 3。清水河上游流域的模拟结果很好, NSE 值为 0.73, R^2 值达到 0.76。苦水河流域 R^2 值为 0.69, 但是 NSE 值仅为 0.03, 表明模拟径流序列与实测径流趋势一致, 但模拟值与实测值有差异。从 MAE 和 RMSE 结果可知, 清水河上游模型模拟值相对苦水河的模拟值更接近实测值。苦水河流域在 2009 年以后由于受到引黄灌溉的影响, 年径流呈上升趋势, 因资料受限, 模型未能考虑引黄灌溉, 因此, 没有捕捉到苦水河流域近年来的上升趋势。

评价指标	率定期				验证期	
	R^2	NSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE
清水河上游	0.76	0.73	1.26	1.61	0.2	1.45
苦水河	0.69	0.03	2.84	3.48	4.42	5.04

2.3 生态建设措施对径流变化贡献率分析

利用弹性系数法进一步分析不同生态建设措施对宁夏典型入黄流域径流变化的贡献率。以宁夏境内开始大规模退耕还林还草措施和大规模发展淤地坝时间的时间节点 2000 年作为分界点, 将研究资料序列分为基准期和变化期 2 个时段。在基准期和变化期 2 个时间窗口中, 若气候变化和生态建设措施中

某个影响因素对径流减小的贡献率计算值为正, 则表明该影响因素和年径流量呈现负相关关系, 表明该影响因素对径流减少起到促进作用; 若气候变化和生态建设措施中某个影响因素对径流减小的贡献率计算值为负, 则表明该影响因素和年径流量呈现正相关关系, 表明该影响因素对径流减少起到抑制作用。

2.3.1 清水河上游生态建设措施对年径流量变化贡献率 清水河上游流域全时期, 基准期和变化期年径流深、年潜在蒸散发和年降水量, 以及基准期相对于变化期各水文要素的变化率见表 4。基准期 1987—2000 年径流深为 11.35 mm, 年降水量为 407.68 mm, 年潜在蒸发量为 954.41 mm, NDVI 为 0.39, 淤地坝指数 0.000 1; 变化期 2001—2013 年径流深为 4.59 mm, 降水量为 395.35 mm, 潜在蒸发量为 980.36 mm, NDVI 为 0.43, 淤地坝指数 0.009 1。变化期径流深相对于基准期减少 6.76, 变化率为 -59.55%; 降水量变化期相对于基准期减少 12.33, 变化率为 -3.02%; 潜在蒸散发变化期的值相对于基准期增加 25.94, 变化率为 2.72%; NDVI 变化期相对于基准期增加 0.04, 变化率为 10.26%, 淤地坝指数变化期相对于基准期增加 0.009, 变化率为 13 982.95%。

表 4 清水河上游气象水文因素和生态建设措施指标统计

时期	R/mm	$\Delta R/\%$	P/mm	$\Delta P/\%$	E_0/mm	$\Delta E_0/\%$	NDVI	$\Delta \text{NDVI}/\%$	RI	$\Delta \text{RI}/\%$
全时期	8.10		401.75		966.91		0.41		4.4e-03	
基准期	11.35		407.68		954.41		0.39		6.4e-05	
变化期	4.59	-59.55	395.35	-3.02	980.36	2.72	0.43	10.26	9.1e-05	13982.95

降水弹性系数为 3.58,潜在蒸散发弹性系数为 -2.67,NDVI 弹性系数为 -1.97,淤地坝指数弹性系数为 -0.19。植被通过增加截留降水和蒸发量直接减少净降水量,因此,对减少地表径流有很大影响。此外,草地覆盖率和农业面积的增加也影响蒸散量的增加,从而导致径流减少;淤地坝可改变下垫面,增加入渗和截流,从而减少径流。因此,清水河上游流域的 NDVI 和淤地坝指数计算的弹性系数 <0 ,结果合理。

清水河上游流域降水对径流减少的贡献率为 13.17%,潜在蒸散发对径流减少的贡献率为 8.58%;植被、淤地坝及其他生态建设措施对径流减少的贡献率分别为 23.11%,46.50%,8.64%。除去其他影响因素外,淤地坝增加是对清水河上游流域径流减少影响最大的因素,其次是植被的增加,最后是潜在蒸散发的减小。从计算结果得出,清水河上游流域生态建设措施增加对径流减少的影响远大于气候变化对清水

河上游流域径流减少的影响。

2.3.2 苦水河流域生态建设措施对年径流量变化贡献率 苦水河流域全时期、基准期和变化期平均年径流深、年潜在蒸散发和年降水量,以及基准期相对于变化期各影响因子变化率见表 5。基准期(1994—2000 年)年径流深为 32.62 mm,年降水量为 264.54 mm,年潜在蒸发量为 1 170.16 mm,NDVI 为 0.32,年均淤地坝指数 0.000 01;变化期(2001—2013)年径流深为 24.67 mm,年降水量为 248.80 mm,年潜在蒸散发为 1 146.67 mm,NDVI 为 0.35,淤地坝指数 0.000 02。变化期径流量相对于基准期减少 7.95,变化率为 -24.37%;变化期降水量相对于基准期减少 15.74,变化率为 -6.66%;变化期潜在蒸散发量相对于基准期减少 23.49,变化率为 2.01%;变化期 NDVI 相对于基准期增加 0.03,变化率为 9.78%;变化期淤地坝指数相对于基准期增加 $1e-05$,变化率为 53.85%。

表 5 苦水河流域气象水文因素和生态建设措施指标统计时期

日期	R/mm	$\Delta R/\%$	P/mm	$\Delta P/\%$	E_0/mm	$\Delta E_0/\%$	NDVI	$\Delta \text{NDVI}/\%$	RI	$\Delta \text{RI}/\%$
全时期	27.45		255.01		1154.89		0.34		0	
基准期	32.62		264.54		1170.16		0.32		$1e-05$	
变化期	24.67	-24.37	248.80	-6.66	1146.67	-2.01	0.35	9.78	$2e-05$	53.85

苦水河流域基于降水的弹性系数为 1.97,潜在蒸散发的弹性系数为 -0.98,NDVI 的弹性系数为 -0.58,淤地坝指数弹性系数为 -0.08。降水对径流减少贡献率为 47.30%,变化期降水相对于基准期减少,所以降水对径流减少贡献率为正;潜在蒸散发和降水类似,因为变化期潜在蒸散发量小于基准期,所以潜在蒸散发对径流减少贡献率为 -6.87%;植被和淤地坝变化及其他生态建设措施对径流减少贡献率分别为 18.57%,13.96%,27.04%。从对径流减少的贡献率来看,除去其他因素,降水减少是苦水河流域径流减少最主要的影响因素,其次是植被增加,淤地坝增加对径流减少的减小贡献率相对植被的增加影响较小。

3 讨论

本研究表明,生态建设措施是流域径流变化的主导因素,刘昌明等^[25]研究发现,在 20 世纪后半叶,气候变化是黄河上游径流减少的主要因素。21 世纪后,我国政府在黄河流域实施的一系列生态建设措施,影响径流变化的主要因素开始发生转变,Zhang 等^[26]研究黄土高原径流变化时发现,11 个研究流域中 8 个流域土地利用变化导致下垫面条件变化,从而引发径流变化;姬广兴等^[27]研究发现,人类活动引起的植被变化是黄河上游流域径流变化的主导因素。

本研究的宁夏典型入黄流域径流变化的归因结果在总体上是一致的。本文还构建植被和淤地坝同时作用下的径流模型,有助于更全面量化人类活动对径流的影响。

4 结论

(1)宁夏典型入黄流域中清水河上游及苦水河多年径流变化均呈减小趋势,且年径流突变基本都发生在 2000 年左右,流域降水和潜在蒸散发量均呈波动变化,但整体变化幅度较小,NDVI 和淤地坝指数在 2000 年以后呈急剧增加趋势,并在 2015 年以后逐渐趋于稳定,清水河上游和苦水河水热耦合控制参数均呈现先减小后增大的变化趋势。

(2)宁夏典型入黄流域水热耦合控制参数与 NDVI 及淤地坝指数有着相同的变化趋势且有显著的正相关关系,在考虑 NDVI 和淤地坝指数的回归方程对水热耦合控制参数的拟合度 R^2 分别为 0.87 和 0.85,且径流模型精度评估结果良好。

(3)清水河上游流域降水对径流减少的贡献率为 13.17%,潜在蒸散发对径流减少的贡献率为 8.58%;植被和淤地坝以及其他生态建设措施对径流减少的贡献率分别为 23.11%,46.50%以及 8.64%,生态建设措施增加对径流减少的影响远大于气候变化对径

流的影响。苦水河降水对径流减少贡献率为47.30%，潜在蒸散发对径流减少贡献率为-6.87%；植被和淤地坝及其他生态建设措施对径流减少贡献率分别为18.57%，13.96%和27.04%，降水减少是苦水河流域径流减少最主要的影响因素。

参考文献:

- [1] 李敏欣, 邹磊, 夏军, 等. Budyko 框架下白河流域径流演变及其归因分析[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(4): 774-782.
- [2] Li Z Y, Huang S Z, Liu D F, et al. Assessing the effects of climate change and human activities on runoff variations from a seasonal perspective [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2020, 34(3): 575-592.
- [3] Li H, Shi C, Sun P, et al. Attribution of runoff changes in the main tributaries of the middle Yellow River, China, based on the Budyko model with a time-varying parameter[J]. Catena, 2021, 206: e105557.
- [4] 徐宗学, 赵捷. 生态水文模型开发和应用: 回顾与展望[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 346-354.
- [5] Guo A J, Chang J X, Wang Y M, et al. Uncertainty analysis of water availability assessment through the Budyko framework[J]. Journal of Hydrology, 2019, 576: 396-407.
- [6] 杨大文, 张树磊, 徐翔宇. 基于水热耦合平衡方程的黄河流域径流变化归因分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2015, 45(10): 1024-1034.
- [7] 赵香桂, 黄生志, 赵静, 等. 干旱与湿润区流域时变水热耦合参数的归因分析[J]. 生态学报, 2021, 41(24): 9805-9814.
- [8] 刘平, 岳自慧, 王文, 等. 宁夏压砂地水土流失风险及防治对策[J]. 中国水土保持, 2022(2): 21-22.
- [9] 楼晓钦, 牛锦凤, 黄维. 宁夏引黄灌区生态建设状况及保护措施研究[J]. 宁夏农林科技, 2016, 57(2): 41-44.
- [10] Zhang J J, Gao G Y, Fu B J, et al. Formulating an elasticity approach to quantify the effects of climate variability and ecological restoration on sediment discharge change in the loess plateau, China[J]. Water Resources Research, 2019, 55(11): 9604-9622.
- [11] 张树磊, 杨大文, 杨汉波, 等. 1960—2010 年中国主要流域径流量减小原因探讨分析[J]. 水科学进展, 2015, 26(5): 605-613.
- [12] 雷泽鑫, 傅健宇, 罗俊杰, 等. 景观格局视角下晋西三川河流域径流变化归因分析[J]. 生态学报, 2022, 42(12): 4946-4958.
- [13] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报[J]. 中国水土保持, 2013(10): 2/3, 11.
- [14] 宋晓猛, 占车生, 孔凡哲, 等. 大尺度水循环模拟系统不确定性研究进展[J]. 地理学报, 2011, 66(3): 396-406.
- [15] 赵吉麟. 宁夏回族自治区森林立地类型划分及其生态功能重要性评价[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [16] 李占斌. 宁夏淤地坝运行风险研究[R]. 西安: 西安理工大学, 2017-01-20.
- [17] Yu K X, Zhang X, Xu B X, et al. Evaluating the impact of ecological construction measures on water balance in the Loess Plateau region of China within the Budyko framework [J]. Journal of Hydrology, 2021, 601: e126596.
- [18] Budyko M I. Climate and life[M]. New York: Academic Press, 1974.
- [19] 傅抱璞. 论陆面蒸发的计算[J]. 大气科学, 1981, 5(1): 23-31.
- [20] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56[J]. Fao, Rome, 1998, 300(9): e05109.
- [21] 王蕾, 王鹏新, 田苗, 等. 效率系数和一致性指数及其在干旱预测精度评价中的应用[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(1): 229-235, 251.
- [22] Schaake J C. From climate to flow, Climate change and US water resources [J]. New York: John Wiley and Sons, 1990: 177-206.
- [23] Sankarasubramanian A, Vogel R M, Limbrunner J F. Climate elasticity of streamflow in the United States[J]. Water Resources Research, 2001, 37(6): 1771-1781.
- [24] 贾路, 于坤霞, 邓铭江, 等. 西北地区降水集中度时空演变及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2021, 37(16): 80-89.
- [25] 刘昌明, 张学成. 黄河干流实际来水量不断减少的成因分析[J]. 地理学报, 2004, 59(3): 323-330.
- [26] Zhang X P, Zhang L, Zhao J, et al. Responses of streamflow to changes in climate and land use/cover in the Loess Plateau, China[J]. Water Resources Research, 2008, 44(7): eW00A07.
- [27] 姬广兴, 高慧珊, 黄珺婧, 等. 黄河上游流域径流变化特征与归因分析研究[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2023, 51(1): 12-19.