

顿文伟,梁丽霞,陶虎,等.变化环境下渭河流域径流演变归因及空间异质性研究[J].人民珠江,2026,47(5):1-13.

# 变化环境下渭河流域径流演变归因及空间异质性研究

顿文伟<sup>1</sup>,梁丽霞<sup>2</sup>,陶虎<sup>3</sup>,王一博<sup>3\*</sup>

(1. 甘肃省水土保持科学研究所/甘肃省水土保持工程研究中心,甘肃 兰州 730000;2. 甘肃省水利厅,甘肃 兰州 730000;  
3. 兰州大学资源环境学院,甘肃 兰州 730000)

**摘要:**渭河流域作为黄河中游典型的半干旱—半湿润过渡带,其径流演变直接关系到区域水安全与黄河生态健康。基于ERA5-Land再分析数据及社会经济数据,采用Budyko假设水量平衡框架与随机森林模型,分析2003—2024年流域径流演变的主控机制及其空间异质性。结果表明:①流域径流总体呈波动下降趋势(速率为 $-1.525$  mm/a),且衰减特征存在空间非均匀性;②在水量平衡层面,气候“暖干化”是径流减少的主导因素(贡献率61.33%),人类活动贡献率为38.67%;③驱动机制呈现显著的“空间二元结构”:虽然气候决定水量基准,但人均生产总值在统计上超越自然因子成为首要解释变量,这归因于中下游关中平原高强度经济耗水的控制,而上游山区仍受降水主导。研究厘清流域“自然—社会”二元水循环的空间分异规律,提出“上游适应性保护、下游需求侧调控”的分区治理策略。

**关键词:**渭河流域;径流归因;Budyko假设;随机森林;空间异质性

**中图分类号:** 文献标识码: 文章编号:1001-9235(2026)05-0001-13

径流是陆地水循环的重要组成部分,是联系气候系统、陆面过程与人类社会用水活动的关键纽带,其变化特征直接影响区域水资源安全、生态系统稳定性以及社会经济可持续发展。尤其在干旱与半干旱地区,水资源本身高度匮乏,径流对气候变化和人类活动扰动的敏感性大,微小的气候波动或人类用水强度变化都可能引发显著的水文响应,从而加剧区域水资源供需矛盾<sup>[1-3]</sup>。渭河流域作为黄河流域最大的支流,地处我国典型的半干旱—半湿润过渡带,是关中平原经济社会发展的重要水源保障区<sup>[4]</sup>,其径流变化不仅关系到区域防洪安全、农业灌溉和生态需水,也对黄河干流径流过程产生重要影响。识别渭河流域径流变化趋势及其驱动机制,对于科学理解区域水文演变规律、支撑水资源

精细化管理与调控具有重要的理论意义和现实价值。

近年来,针对径流变化特征及其驱动因素的研究表明,气候变化(如降水和潜在蒸散发量变化)与人类活动(如土地利用变化、水库调度、农业灌溉和地下水开采)是影响流域径流变化的两大主导因素<sup>[5-6]</sup>。在方法上,Mann-Kendall趋势检验<sup>[7]</sup>和Sen's slope估计被广泛用于径流变化趋势及其变化速率的识别,水文模型法(如SWAT、VIC等)通过构建精细的物理过程,能够详尽刻画流域水文循环的时空演变机制,但其参数率定复杂、对高分辨率实测数据依赖性强,且在人类活动剧烈的干旱半干旱区存在较大的模拟不确定性<sup>[7-8]</sup>。统计与机器学习方法(如多元线性回归、随机森林等)优势在于能够灵活

基金项目:甘肃省水利科学试验研究与技术推广计划项目(26GSLK084、26GSLK085);国家自然科学基金项目(U2240226)

收稿日期:2026-02-25 修回日期:2026-03-18

作者简介:顿文伟,高级工程师,主要从事水土保持科研及水资源管理。

通信作者:王一博(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事寒区旱区水文水资源的研究。

联系作者:致信rmzj@pearlwater.gov.cn,由期刊转接。

处理多变量间复杂的非线性关系<sup>[9-10]</sup>；而基于Budyko假设方法<sup>[11-12]</sup>的水量平衡框架因其物理基础清晰、参数需求较少,被广泛用于区分气候变化与人类活动对径流变化的相对贡献。在干旱与半干旱区,相关研究发现径流变化往往呈现出“气候主导、人类活动显著增强”的特征<sup>[13-14]</sup>。

然而,现有研究仍存在一些不足:一方面,多数研究侧重于大流域整体尺度的归因分析,难以揭示径流变化的空间异质性;另一方面,在强人类活动背景下,Budyko假设框架中的下垫面参数往往被直接赋予物理含义,却忽略其作为“综合有效参数”对人类水文调控过程的隐含表征;此外,部分研究在进行多因子归因分析时,缺乏与物理机制约束框架(如Budyko假设分离结果)之间的定量一致性检验,容易导致分析结果与水量平衡意义上的贡献比例出现认知偏差。因此,有必要在干旱半干旱流域中,构建一种将趋势分析、物理约束分离与多因子归因相结合的综合研究框架,以更加系统地刻画径流变化的驱动机制。

基于此,本文以渭河流域为研究对象,综合多源水文、气象、遥感及社会经济数据,系统分析2003—2024年间径流变化特征及其驱动因素。采用Mann-Kendall趋势检验和Sen's slope方法、

Budyko假设水量平衡框架,对径流变化进行气候因素与人类活动因素的定量分析,明确两类驱动因素在流域尺度上的相对贡献;选取降水、气温、蒸散发、归一化植被指数(NDVI)、人均生产总值(GDP)、灌溉密度和地下水埋深等七个指标,进一步进行多因子归因分析,并结合Sen's slope空间分布,探讨不同驱动因子对渭河径流变化的空间响应特征。提高径流归因结果的物理一致性,也为干旱半干旱区水资源变化机制研究和流域水资源管理提供科学依据。

## 1 研究区概况及方法

### 1.1 研究区概况

渭河流域位于中国西北地区黄河中游,属于黄河上游的河源区,是黄河最大的一级支流,流域面积约13.5万km<sup>2</sup>。流域地形总体呈西高东低格局,上游以黄土丘陵和山地为主,中下游为关中平原,是我国重要的粮食生产和经济发展区域。年平均气温6~14℃,年平均降水量450~700mm,占全年降水量的60%以上,年潜在蒸散发量1000~2000mm,气候为温带大陆性季风气候。渭河流域人口密集、农业灌溉和工业用水强度大,人类活动对水文过程的干扰显著<sup>[15-17]</sup>。

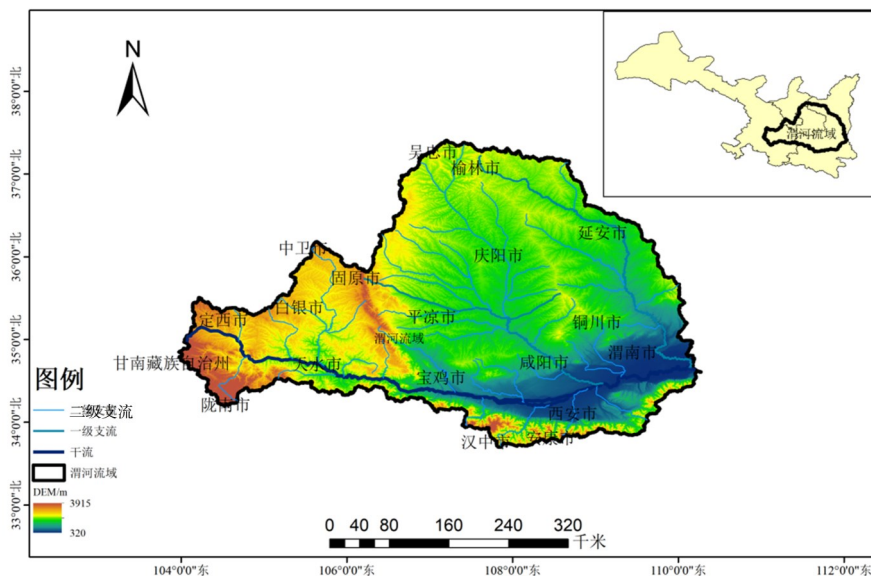


图1 研究区概况

Fig. 1 Study area

## 1.2 数据来源

本文所采用的气象、水文、生态及社会经济数据来源见表 1。研究所用降水、潜在蒸散发量和径流数据来自 ERA5-Land 再分析产品,具有时间连续性好、空间覆盖完整等优势,已被广泛应用于区域水文与气候变化研究。植被状况指标选用归一化的植被指数(NDVI),来源于国家青藏高原科学数据中心;社会经济指标:由于高分辨率取用水数据难以获取且人均生产总值(GDP)可以用来衡量人类社会经济活动对径流的影响<sup>[14,18]</sup>,所以人类活动影响指标选取人均生产总值,数据来源于《中国城市统

计年鉴》;灌溉密度数据采用中国灌溉耕地年度分布数据集;地下水埋深数据来源于《中国地质环境监测地下水水位年鉴》。

为保证不同数据源之间的可比性和分析的一致性,本文对所有数据进行了归一化处理。首先,对不同空间分辨率的数据采用双线性插值或面积加权方法重采样至统一空间分辨率  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ;其次,对时间尺度不一致的数据通过年尺度聚合或插值方法进行统一,以构建 2003—2024 年连续的年度数据序列;最后,结合渭河流域边界,对各类数据进行空间裁剪,仅保留流域范围内的有效格点。

表 1 数据来源

Tab. 1 Data sources

数据类型	数据来源	时间范围	分辨率
降水	ERA5-Land	2003—2024	$0.1 \times 0.1^{\circ}$
潜在蒸散发量	ERA5-Land	2003—2024	$0.1 \times 0.1^{\circ}$
径流	ERA5-Land	2003—2024	$0.1 \times 0.1^{\circ}$
归一化植被指数	国家青藏高原科学数据中心	2003—2024	250 m
人均生产总值	中国城市统计年鉴	2003—2024	$0.25 \times 0.25^{\circ}$
灌溉密度	中国灌溉耕地年度分布数据集	2000—2020	250 m
地下水埋深	中国地质环境监测地下水水位年鉴	2005—2024	1 km

## 1.3 径流准确性对比

为评估 ERA5-Land 再分析径流数据集在渭河流域的适用性,本研究采用流域源头代表性测站(渭源站,控制面积约  $108 \text{ km}^2$ )2003—2015 年的实测年径流深数据进行了精度验证。考虑到 ERA5 单个网格的空间分辨率与单测站控制流域面积存在尺度不匹配,直接比较绝对水量会引入不可避免的系统性偏差。因此,本研究引入了标准化距平方法对实测值与模拟值进行无量纲化处理。该方法能够有效消除空间尺度差异带来的绝对量级偏差,从而重点评估数据集对径流年际变率及极端丰枯特征的捕捉能力。

## 1.4 Mann-Kendall 趋势检验

Mann-Kendall(M-K)趋势检验是一种非参数统计方法<sup>[19]</sup>,广泛应用于水文气象时间序列趋势分

析,其优点在于不要求样本服从特定分布,且对异常值不敏感,适用于径流等具有显著年际波动特征的水文变量(Hirsch et al., 1982)。本文采用 M-K 检验对渭河流域径流时间序列的变化趋势进行识别,以判断径流在研究期内是否存在显著的单调变化趋势。在确定径流变化趋势的基础上,进一步采用 Sen's slope 方法<sup>[20]</sup>对径流变化速率进行定量估计。Sen's slope 是一种稳健的非参数斜率估计方法,能够有效避免极端值对趋势幅度估计的影响,常与 M-K 检验结合使用,用于刻画水文要素变化的定量特征。

## 1.5 基于 Budyko 假设的径流贡献分离方法

为定量区分气候变化与人类活动对径流变化的相对贡献,本文采用基于 Budyko 假设的水量平衡分离方法<sup>[14]</sup>。Budyko 假设理论认为,在多年平均

尺度上,流域蒸散发与降水和潜在蒸散发量之间存在稳定的函数关系,该关系可用于描述水分与能量的长期平衡状态(Budyko, 1974)。本文选用 Fu (1981)提出的 Budyko 假设函数形式:

$$\frac{ET}{P} = 1 + \frac{PET}{P} - \left[ 1 + \left( \frac{PET}{P} \right)^n \right]^{1/n} \quad (1)$$

式中:ET为实际蒸散发;P为降水量;PET为潜在蒸散发量;n为综合下垫面参数。基于水量平衡关系  $Q=P-ET$ ,可进一步得到径流对气候因子变化的弹性系数,从而估算气候变化导致的径流变化量:

$$\Delta Q_{climate} = \varepsilon_P \Delta P + \varepsilon_{PET} \Delta PET \quad (2)$$

式中: $\varepsilon_P$ 、 $\varepsilon_{PET}$ 分别为径流对降水和潜在蒸散发量的弹性系数。将总径流变化量  $\Delta Q_{total}$  与气候变化引起的径流变化量进行比较,其剩余部分可归因于人类活动影响:

$$\Delta Q_{human} = \Delta Q_{total} - \Delta Q_{climate} \quad (3)$$

需要指出的是,在强人类活动干扰背景下,Budyko 假设模型中的参数  $n$  反映的是流域综合水文调控特征,而非单一自然下垫面属性。本文主要关注 Budyko 假设框架对径流归因结果的物理约束作用,而不对参数  $n$  的具体物理含义作过度解释。

### 1.6 随机森林归因分析方法

在 Budyko 假设分离确定自然因素与人类活动整体贡献比例的基础上,进一步采用随机森林模型,对径流变化的具体驱动因子进行定量归因分析。随机森林<sup>[21]</sup>是一种基于多决策树集成的非参数机器学习方法,具有较强的非线性拟合能力和抗过拟合性能,已被广泛应用于水文归因与预测研究中。

本文选取降水、气温、蒸散发、NDVI、人均生产总值、灌溉密度和地下水埋深七个指标作为输入变量,以径流变化量为响应变量,构建随机森林回归模型。为了定量评估各驱动因子的相对贡献,本研究采用基于袋外数据(Out-of-Bag, OOB)的均方误差增加率来计算特征重要性,见式(4):

$$VI_j = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (MSE_{OOB,t}^j - MSE_{OOB,t}) \quad (4)$$

式中: $VI_j$ 为第j个特征变量的特征重要性评分; $N$ 为随机森林模型中构建的决策树总数,本研究参数设定为500; $t$ 为随机森林中的第 $t$ 棵决策树, $t=1, 2, \dots, N$ ;  $MSE_{OOB,t}^j$ 为第 $t$ 棵决策树基于原始、未经修改的袋外数据(OOB样本)计算得出的预测均方误差(Mean Squared Error;  $MSE_{OOB,t}^j$ )为在第 $t$ 棵决策树的袋外数据中,单独将第 $j$ 个特征变量的观测数值进行随机置换后,重新计算得出的预测均方误差。

RF 模型能够捕捉径流变化与各驱动因子之间复杂的非线性关系。需要强调的是,随机森林所得的变量重要性反映的是统计意义上的解释能力,而非直接的水量分解结果。因此,本文将 RF 归因分析结果与 Budyko 假设分离结果相结合,从物理约束和统计关系两个层面综合解析渭河流域径流变化的驱动机制。

## 2 结果

### 2.1 径流趋势变化

标准化后的 ERA5-Land 径流变率与实测变率展现出高度的一致性( $r=0.84$ ,  $p<0.01$ , 异常值  $R^2=0.67$ )。图2所示,ERA5 数据不仅识别出区域的长期径流波动趋势,还能精准捕捉2005、2012年(典型丰水年)以及2004、2009年(典型枯水年)的极端异常信号。上述验证结果充分证明 ERA5 径流数据集满足本研究的精度与可靠性需求。

渭河整体流域内径流量在研究期内呈现明显的年际波动特征,不同年份之间差异较大。在研究期内,整体呈现径流减少的趋势,但也出现不断波动现象,而在个别年份径流量出现升高。M-K 趋势分析表明  $P=0.215 (>0.05)$ , 没有显著变化。Sen's slope 分析表明年均径流量下降为  $-1.525 \text{ mm/a}$  (图3a)。径流变化在空间上具有明显的异质性,不同区域变化幅度和方向存在差异(图3b)。部分区域呈现较为明显的正变化速率,而另一些区域则以负变化速率为主。径流变化速率在流域中部和局部区域表现出较大的绝对值,其余区域变化相对较缓。

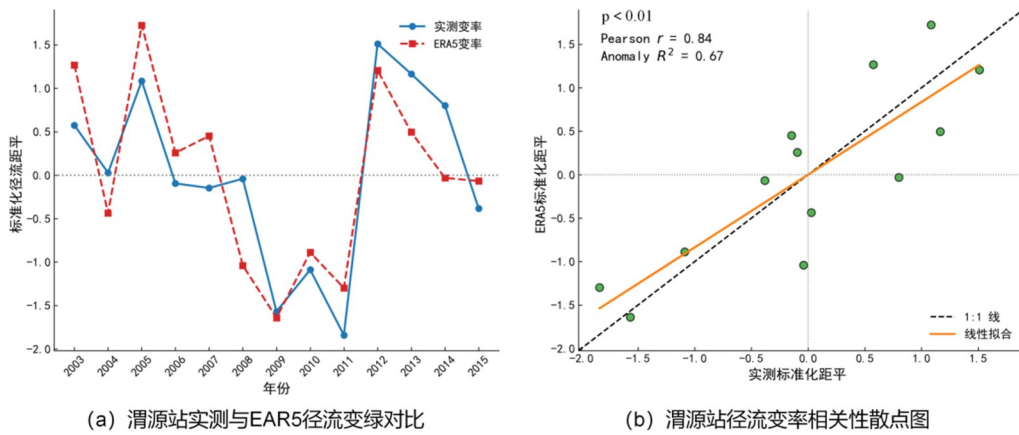


图2 径流准确性对比

Fig. 2 Runoff Accuracy Comparison

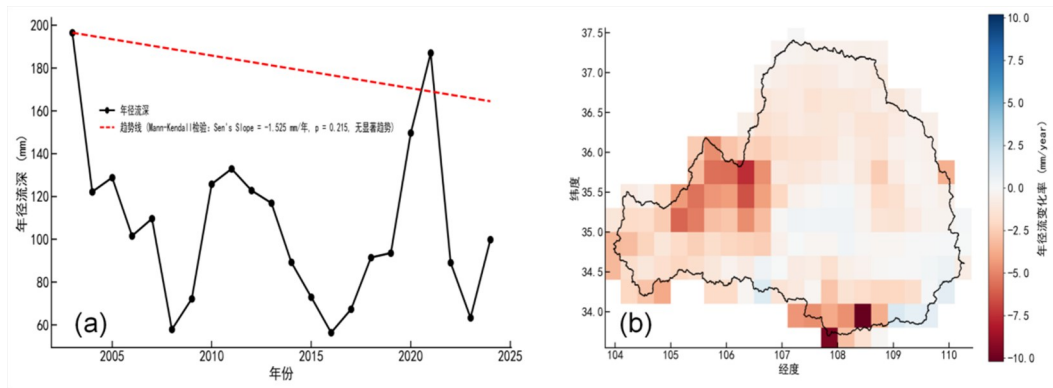


图3 径流趋势分析

Fig. 3 Runoff Trend Analysis

## 2.2 Budyko 贡献分离

2003—2024 年渭河流域径流变化中气候因素和人类活动因素贡献率的空间分布特征(图4)。整体来分析,流域内气候贡献率普遍高于人类活动贡献率。气候贡献率在大部分区域集中分布于较高区间,空间分布较为连续;人类活动贡献率相对较低,但在流域内的局部区域呈现出明显的高值分布特征。两类贡献在空间上表现出一定的互补关系,反映区域径流变化驱动因素的空间差异性和各要素之间的相互作用关系。

从时间演变过程来看(图5),气候变化贡献量在研究期内呈现出明显的波动特征。在 2003—

2010 年期间,气候贡献量主要表现为负值,随后在 2011—2014 年间转为正值,并在 2018 年前后再次转为负值,且波动幅度较大,这与总径流距平的变化趋势保持了较高的一致性。相比之下,人类活动贡献量也呈波动变化。虽然其数值在不同年份间存在微小波动,且变化幅度小于气候贡献量的波动幅度。这表明在研究期内的各个滑动窗口时段,径流变化主要还是受气候变化影响较大,人类活动对径流的影响与自然因素出现互补性。总体而言,总径流距平的变化轨迹主要由气候贡献的波动形态所主导,而人类活动则提供了一个互补性的径流影响效应。

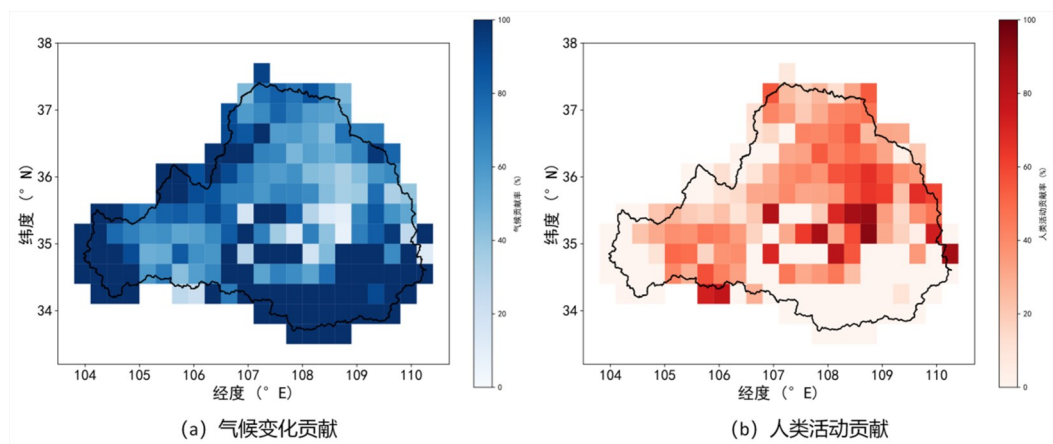


图4 贡献分离

Fig. 4 Contribution separation

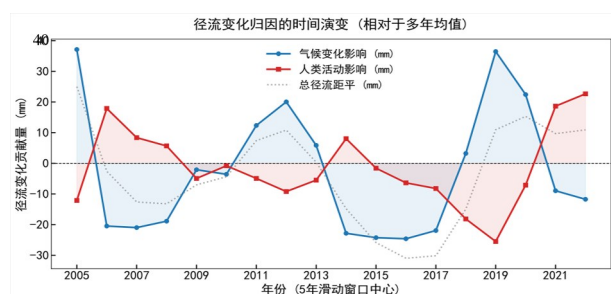


图5 径流贡献变化

Fig. 5 Changes in Runoff Contribution

从流域尺度的定量分离结果来看(表2),研究期内渭河流域径流变化总量为  $-33.41$  mm,其中,气候变化引起的径流变化量为  $-20.49$  mm,人类活动引起的径流变化量为  $-12.92$  mm。对应的贡献率分别为  $61.33\%$ 、 $38.67\%$ ,表明在研究期内渭河流域径流变化主要受气候因素影响。Budyko 假设框架计算得到的流域干燥指数为  $1.04$ ,下垫面参数  $n$  为  $8.00$ 。径流对降水和潜在蒸散发量变化的弹性系数分别为  $3.72$  和  $-3.40$ ,表明径流对降水变化表现为正响应,对潜在蒸散发量变化表现为负响应。

### 2.3 流域主控因子识别

通过流域尺度上各驱动因子对渭河径流变化影响的重要性排序结果表明(图6a),不同因子对径流变化的贡献程度存在明显差异。其中,人均生产总值的重要性最高,占比为  $31\%$ ,其次为降水,占比为  $22\%$ 。NDVI、潜在蒸散发量和气温的贡献相对较低,分别为  $15.4\%$ 、 $11.3\%$  和  $8.3\%$ 。地下水埋深和

表2 分离计算结果

Tab 2 Separated Calculation Results

气候贡献/%	61.33
人类活动贡献/%	38.67
$\Delta Q_{\text{climate}}/\text{mm}$	$-20.49$
$\Delta Q_{\text{human}}/\text{mm}$	$-12.92$
$\Delta Q_{\text{total}}/\text{mm}$	$-33.41$
$n$ 参数	8.00
干燥指数 $\phi$	1.04
$\varepsilon P$	3.72
$\varepsilon \text{PET}$	$-3.40$

灌溉密度的贡献程度较小,占比分别为  $7.9\%$  和  $4.1\%$ 。总体上,各因子的贡献率呈现出由高到低的明显梯度分布特征。

径流变化主控因子的空间分布特征(图6b)。结果显示,渭河流域内主控因子在空间上具有显著异质性,不同区域的主导因子不同。流域大部分区域以降水 and 人均生产总值作为主控因子;整体来看,主控因子在空间上的分布并非均一,而是在流域范围内呈现出明显的区域分异特征。

渭河流域各自然与人类活动驱动因子呈现出显著的差异化演变特征。气象与水文条件方面,流域年均气温呈现明显的波动上升趋势(图7b),反映了气候暖化的区域响应,而降水和潜在蒸散发量虽存在强烈的年际波动,但整体均呈现出微弱的下降

趋势(图 7a、7c)。在生态与社会经济方面,归一化植被指数(NDVI)与人均生产总值表现出极为显著的持续上升趋势,这不仅印证了近年来退耕还林(草)等生态恢复工程的切实成效,也反映了流域社会经济的快速扩张。此外,农业与地下水指标同样

发生了显著演变,灌溉密度整体呈下降趋势(尤其在 2011—2012 年间出现较大幅度下降后在低位波动);地下水埋深亦呈现出整体下降(变浅)的线性趋势,特别是 2018 年后出现了明显的浅层化跃变。

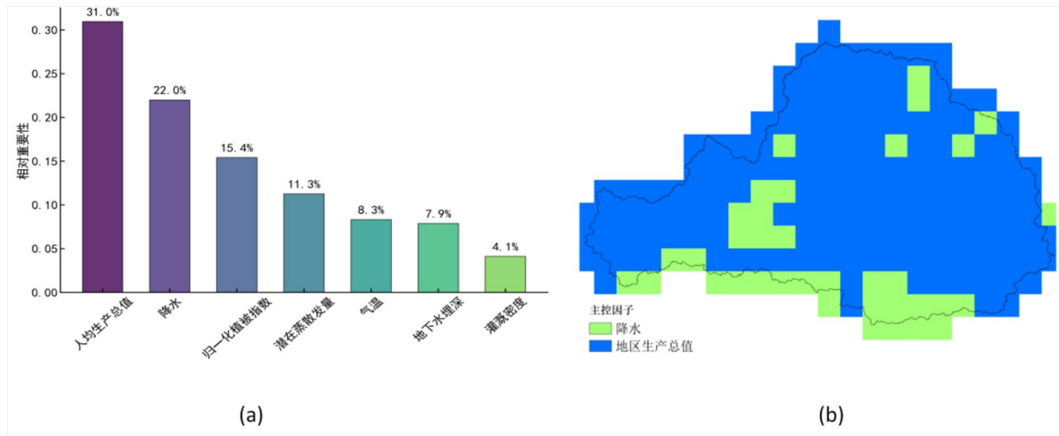


图 6 主控因子识别

Fig 6 Master Regulator Identification

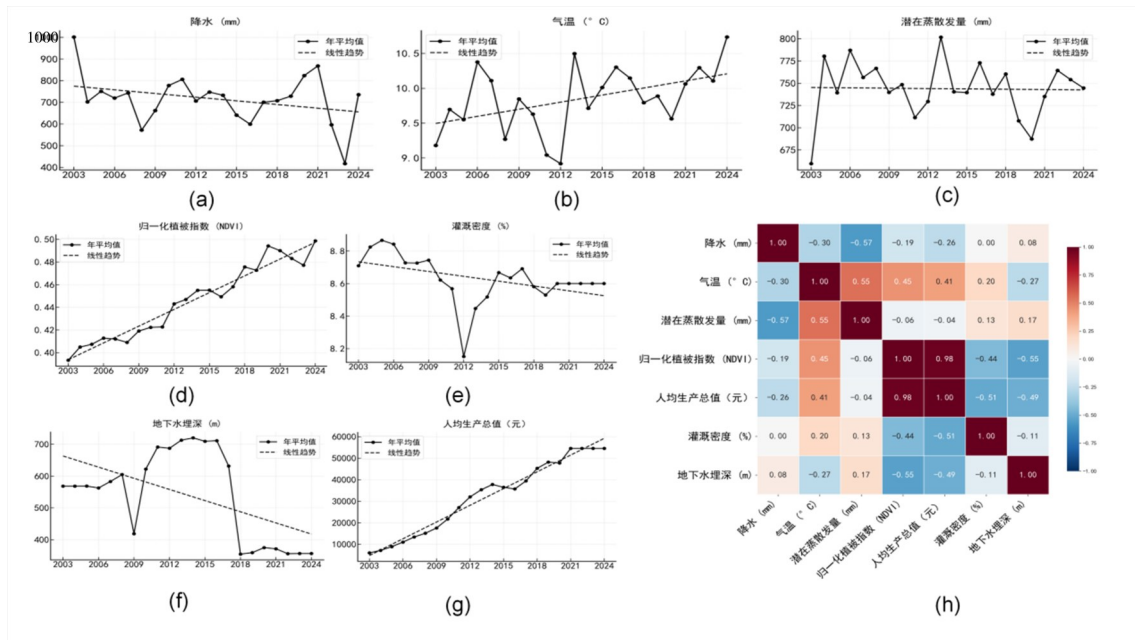


图 7 因子变化趋势及相关性

Fig. 7 Trends and Correlations in Factor Changes

各驱动因子之间并非孤立存在,部分指标间表现出较强的相互影响与耦合关系。Pearson 相关性分析结果表明,NDVI 与人均生产总值之间存在极强的正相关关系( $r = 0.98$ )(图 7h),揭示了流域内

生态环境恢复与社会经济发展在过去二十年中表现出的高度同步性;同时,气温与潜在蒸散发量亦表现出正向耦合( $r = 0.55$ ),符合温度升高驱动蒸散发潜力增加的物理机制。此外,人均生产总值、

NDVI与地下水埋深分别呈现中度负相关( $r = -0.49$ 与 $r = -0.55$ ),反映了人类经济活动和植被耗水对区域地下水动态的复杂反作用。需要指出的是,尽管部分指标(如气温与PET、NDVI与人均生产总值)之间存在较强的相互影响和多重共线性,但本研究选用的随机森林(Random Forest)回归模型采用特征随机子集和决策树集成的机制进行节点分裂,使其对高维数据和多重共线性具有天然的鲁棒性,能够有效降低因指标相互耦合带来的过拟合风险,从而切实保障了径流归因结果的可靠性与科学性。

### 3 讨论

本文的研究结果揭示了2003—2024年间渭河流域径流演变的复杂性及其驱动机制的空间差异。Mann-Kendall趋势检验与Sen's slope分析表明,渭河流域径流整体呈现下降趋势,与何毅<sup>[22]</sup>等人对黄河中游的河流发现的结果较为相符。基于Budyko假设的水量平衡归因结果显示,气候变化是径流减少的主导因素,其贡献率为61.33%,而人类活动贡献率约为38.67%。这一比例表明,尽管人类活动干扰强烈,但在流域尺度上的水量平衡中,降水减少与潜在蒸散发量增加构成的气候“旱化”趋势仍是径流衰减的决定性背景<sup>[23]</sup>。然而,仅依靠总量的分离会掩盖流域内部剧烈的空间异质性,随机森林(RF)归因模型的结果进一步表明:在所有驱动因子

中,人均生产总值被识别为对径流变化影响最大的因子,其次才是降水。这种“Budyko假设归因中气候主导”与“机器学习人均生产总值主导”的表面差异,恰好反映渭河流域“自然—社会”二元水循环系统的空间分异特征。Budyko框架立足于宏观物理约束,着眼于水资源总量的长期绝对平衡,气候条件决定了流域产流的“物理基础”;而随机森林模型则是基于微观统计敏感度,其特征重要性反映的是驱动因子对径流年际“波动方差”的解释能力。在中下游关中平原等高强度人类活动区,虽然降水决定了水量的基数,但伴随经济高速增长而引发的工业、生活及农业取用水的剧烈变动,构成了极强的动态扰动源,主导了该区域径流演变的方差波动。因此,Budyko揭示了气候对水资源“本底总量”的宏观控制,而机器学习则精准捕捉了人类社会经济活动对径流“演变过程”的微观统计敏感性。

进一步结合七个驱动因子的Sen's slope空间分布趋势(图8)与主控因子格点图分析(图6),可以识别出渭河流域径流变化的双重驱动机制。在渭河流域西部上游及南部下游部分地区,降水呈现减少趋势,但人类活动密度相对较低,主控因子分析显示该区域径流变化主要受降水控制(图8)。这将解释为何在Budyko假设框架下自然因素贡献占据主导,因为广阔的山区产流区对降水亏缺表现出直接且敏感的水文响应<sup>[24]</sup>。

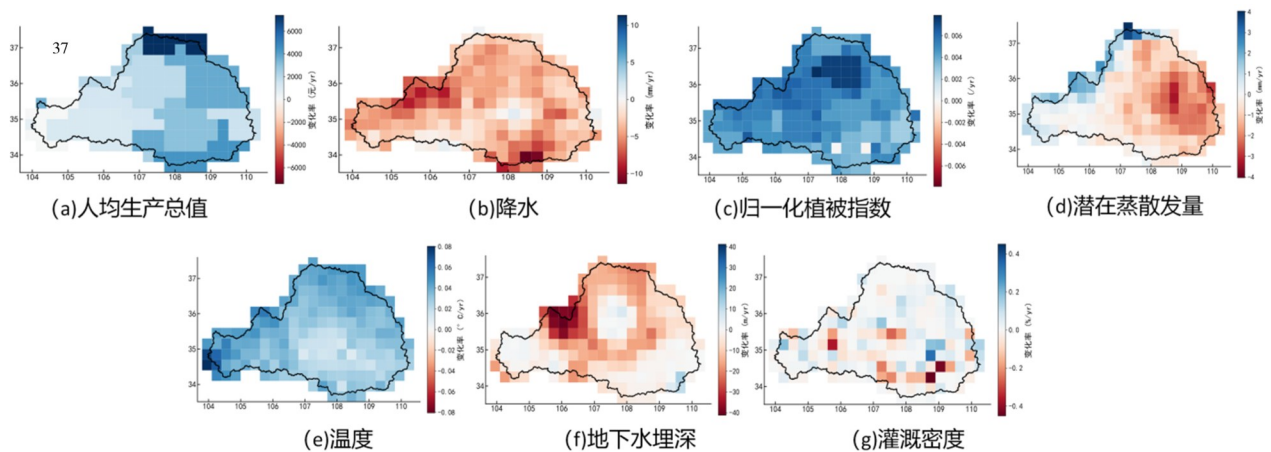


图8 主控因子变化

Fig. 8 Changes in master regulators

相反,在中下游关中平原腹地,人均生产总值呈现显著增长趋势,同时伴随着灌溉密度的维持与地下水埋深的增加。RF模型将人均生产总值识别为首要因子,是因为在这些人类活动高强度区,经济发展驱动的工业与生活用水增加,以及农业灌溉的高耗水过程,对径流产生强烈的截留与消耗,其边际影响在统计上超过气候波动的信号<sup>[25]</sup>。栾金凯等<sup>[26]</sup>在人类活动对径流的影响研究中也表明,当前对于径流归因中考虑自然因素过多,对人类活动的影响考虑较少,本文的研究也进一步表明人类活动对径流的影响逐渐在增大。因此,在未来径流变化影响因素研究中,对人类活动的影响也应该被考虑到流域水文模型中,并量化分析对径流的影响。此外,本研究中NDVI在全流域大部分区域呈显著增加趋势,这得益于“退耕还林(草)”工程的实施效应。植被恢复虽然改善了陆地生态环境,但也通过增加植被蒸腾与冠层截留等过程进一步减少了地表径流<sup>[27]</sup>,这一因素在自然与人类活动的耦合作用范围表现尤为明显。

另外,一般自然状态下,流域的 $n$ 值通常为1.5~3.0。当 $n$ 值显著偏高时,意味着在同等干旱指数下,降水转化为径流的比例极低,大量水分被截留并通过蒸散发返回大气。本研究中通过反演得到的下垫面参数 $n$ 值较高( $n=8$ ),这并非单纯反映自然下垫面属性,而是作为一个综合参数,进一步从另一个方面表征了人类活动对流域储水与产流关系的非线性改变,周惠成等<sup>[28]</sup>在对水库引水的研究中就发现,人类活动对径流的影响复杂多变,只有高效的引水策略对径流有益。在研究期内所有年份的点均显著偏离了代表一般自然状态的参考曲线( $n=2$ ),而紧密地分布于高参数拟合曲线附近,且极度贴近Budyko假设框架的物理上限(图9)。这种分布特征直观地揭示渭河流域较高的蒸散发效率与低的产流系数。

这种高 $n$ 值(即高耗水、低产流特征)源于上下游两方面强烈的人类干扰。渭河流域地处黄土高原腹地,自20世纪末以来在该流域实施了大规模的水土保持工程(如梯田建设与淤地坝修建)与“退

耕还林(草)”生态工程。这些工程措施显著增加了地表粗糙度与土壤入渗能力,产生强烈的“海绵效应”,使得原本应转化为地表径流的降水被大量拦截并转化为土壤水,最终通过土壤蒸发和植被蒸腾消耗<sup>[29-30]</sup>。黄土高原地区密集的淤地坝系统拦截了大量泥沙与径流,形成了众多小型水面与湿地,增加无效蒸发<sup>[31]</sup>,这种人为截留效应在数学上表现为Budyko假设参数 $n$ 的异常升高。此外,关中平原高密度的农业灌溉与工业用水直接消耗径流,使得流域出口断面的实测径流进一步减少,导致蒸发指数( $ET/P = 1 - Q/P$ )被人为推高至接近1.0的极限状态。因此,拟合分析得到的高值 $n$ 反映渭河流域在强人类活动干扰下“高耗水、低产流”的水文循环特征,与该区域其他相关研究中关于下垫面参数显著增加的结论相吻合<sup>[27]</sup>。

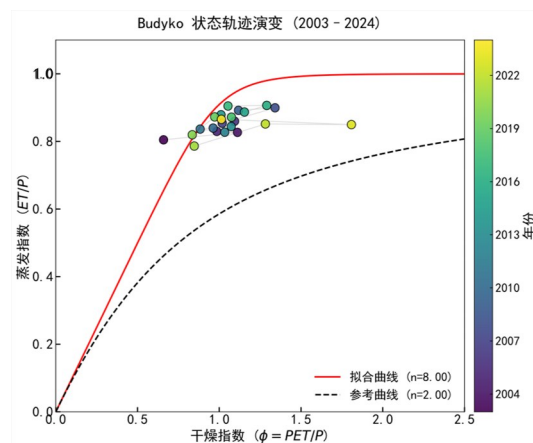


图9 参数 $n$ 拟合变化

Fig. 9 Fitting change of parameter  $n$

渭河流域的径流减少是气候暖干化背景与局部高强度人类耗水叠加的结果。对于渭河流域及类似的半干旱一半湿润过渡带流域,单一的管理模式已难以适应空间显著分异的水文情势,建议实施基于归因结果的分区差异化水资源管理策略。在以气候变化为主导的上游及水源涵养区,管理重点应在于“适应性保护”,通过加强水源涵养林建设与水土保持,提高生态系统对降水波动与极端干旱的缓冲能力,确保持续产流功能。在中下游人均生产总值主导区,核心在于“需求侧调控”,通过产业结

构调整与节水灌溉,降低经济增长对水资源的边际消耗,缓解“人水争地”矛盾。

尽管本文构建的“物理约束—多因子统计”综合归因框架有效揭示了渭河流域径流演变的复杂驱动机制,但本研究仍存在一定的局限性。首先,在人类活动特征的定量表征上,受限与长序列、高时空分辨率实际取耗水观测数据的缺乏,本文采用格点化人均生产总值(GDP)表征人类对径流的影响指标。该方法虽然在统计尺度上具有较强的代表性,但未能精细刻画流域内具体的水库调度、跨流域调水、工农业实体耗水量等微观水文调控过程。其次,现有的 Budyko 框架与随机森林归因模型主要聚焦于年际尺度上的长期时空变异,对季节尺度波动及极端水文气象事件(如短历时暴雨、长期连旱)的非线性响应机制探讨相对不足。

针对上述局限性,未来研究可考虑以下方向予以深化:一是致力于多源异构大数据的融合,引入高分辨率的卫星遥感反演数据(如 GRACE 重力卫星反演的地下水储量变化)与更精细的社会经济实体取用水统计数据,以提升人类活动扰动的物理量化精度;二是尝试将可解释的机器学习算法与分布式物理水文模型(如 SWAT 或 VIC 等)进行深度时空耦合。这种“物理机制与数据驱动相结合”的方法,将有助于在更加精细的时空尺度上,实现对受人类活动强烈干扰的“自然—社会”复杂二元水循环演变过程的动态、系统模拟。

## 4 结论

a)渭河流域径流在 2003—2024 年间呈现时空衰减特征。研究期内流域径流总体呈非显著的波动下降趋势(变化量为  $-33.41\text{ mm}$ ),且年际波动剧烈。在空间上,径流减少并非均匀发生,而是呈现明显的区域差异性,渭河流域大部分区域的径流变化速率为负值,表明流域正处于持续的“干旱化”与产流能力衰退过程中。

b)气候变化是径流减少的主导因素,但高强度人类活动影响也不容忽视。气候变化(降水减少与潜在蒸散发量增加)对径流减少的贡献率约为

62%,人类活动贡献率约为 38%。气候暖干化改变流域水资源演变的基础格局。同时,反演得到的下垫面参数  $n$  值高于自然流域经验值,反映人类活动对流域水文调节功能造成强烈非线性改变。

c)径流驱动机制呈现“上游气候控制—下游经济主导”的空间二元分异结构。流域内部驱动力存在空间异质性。中下游关中平原高强度的人类经济活动与灌溉耗水对径流影响较大;而在上游及山区,降水仍是径流变化的首要主控因子。渭河流域径流变化是广域气候波动与局部高强度社会经济用水共同耦合的结果。

### 参考文献:

- [1] 左芸,俞艳玲,陈杰,等. 时空传播约束下洮河流域水沙过程预测研究[J/OL]. 中国农村水利水电, 1-20 [2025-12-18]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1419.TV.20251212.0923.002>. ZUO Y, YU Y L, CHENG J, et al. Prediction of Water and Sediment Processes under Spatiotemporal Constraints in the Taohe River Basin [J/OL]. China Rural Water and Hydropower, 1-20 [2025-12-18]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1419.TV.20251212.0923.002>. (in Chinese)
- [2] 杨亚飞,张秋芬,吕锡芝,等. 黄河“几字弯”典型半干旱小流域水沙变化及驱动机制[J]. 干旱区研究, 2025, 42(11): 2031-2043. YANG Y F, ZHANG Q F, LYU X Z, et al. Trends and influencing factors of water-sediment variation in the semiarid reaches of the Yellow River's "Ji Zi Bend" [J]. Arid Zone Research, 2025, 42(11): 2031-2043. (in Chinese)
- [3] 夏雪,姚蕊,孙鹏,等. 非平稳条件下黄河流域极端径流频率分析及定量归因[J]. 地理科学, 2025, 45(11): 2362-2373. XIA X, YAO R, SUN P, et al. Evolution pattern and attribution of Extreme Runoff in the Yellow River Basin under Non-Stationary Conditions [J]. Geographical Science, 2025, 45(11): 2362-2373. (in Chinese)
- [4] 江善虎,江宏,朱永卫,等. 基于 PLS-SEM 的渭河流域径流演变效应解耦[J]. 水资源保护, 2025, 41(05): 223-230. JIANG S H, JIANG H, ZHONG Y W, et al. Runoff Evolution Effects decoupling in the Wei River Basin Based on PLS-SEM [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(5): 223-230. (in Chinese)
- [5] BAI X L, Wenzhi Zhao. Impacts of climate change and anthropogenic stressors on runoff variations in major river basins in

- China since 1950 [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 898. DOI:10.1016/j.scitotenv.2023.165349.
- [6] LI Y X, CHEN A F, MAO G Q, et al. Multi-model analysis of historical runoff changes in the Lancang-Mekong River Basin - characteristics and uncertainties [J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 619. DOI:10.1016/j.jhydrol.2023.129297.
- [7] BI C X, MU X M, ZHAO G J, et al. Effects of climate change and human activity on streamflow in the Wei River Basin [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2013, 11(2): 33-38.
- [8] BAO Z X, ZHANG J Y, WANG G Q, et al. Attribution for decreasing streamflow of the Haihe River basin, northern China: climate variability or human activities? [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 460/461: 117-129.
- [9] LIU X, ZHANG X L, KONG X L, et al. Random forest model has the potential for runoff simulation and attribution [J]. *Water*, 2022, 14(13). DOI:10.3390/w14132053.
- [10] 王艺璇, 刘夏, 沈彦军. 随机森林模型在径流变化归因分析中的适用性研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2022, 30(5): 864-874.  
WANG Y X, LIU X, SHEN Y J. Applicability of the Random Forest Model in Attribution of runoff Changes [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(5): 864-874. (in Chinese)
- [11] 曾三峡, 张陵蕾, 陈旻, 等. 变化环境下青藏高原东南缘水源区径流时空变化特征分析 [J]. *人民黄河*, 2025, 47(10): 52-60.  
ZENG S X, ZHANG L L, CHENG W, et al. Analysis of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Runoff in Water Source Area of Along Southeastern Tibetan Plateau Under Changing Environment [J]. *Yellow River*, 2025, 47(10): 52-60. (in Chinese)
- [12] 程明月, 岳帅均, 姬广兴, 等. 基于扩展Budyko模型的淮河上游径流变化多时间尺度归因分析 [J]. *人民黄河*, 2026, 48(1): 33-40.  
CHENG M Y, YUE S J, JI G X, et al. Multi-timescale Attribution Analysis of Runoff Changes in the Middle and Upper Huaihe River Based on the Extended Budyko Model [J]. *Yellow River*, 2026, 48(1): 33-40. (in Chinese)
- [13] 柯浩成, 马晓燕, 马利国, 等. 基于Budyko理论的渭河上游生态建设区径流驱动因素量化分析 [J]. *水资源保护*, 2025, 41(4): 210-218, 227.  
KE H C, MA X Y, MA L G, et al. Quantitative Analysis of Runoff Driving Factors in Ecological Construction Areas of Upper reaches of the Wei River Based on Budyko Theory [J]. *Water Resources Protection*, 2025, 41(4): 210-218, 227. (in Chinese)
- [14] 胡广录, 陶虎, 焦娇, 等. 黑河中游正义峡径流变化趋势及归因分析 [J]. *干旱区研究*, 2023, 40(9): 1414-1424.  
HU G L, TAO H, JIAO J, et al. Runoff Trend and Attribution Analysis of the Zhengyi Gorge in the middle Reaches of the Heihe River [J]. *Arid Zone Research*, 2023, 40(9): 1414-1424. (in Chinese)
- [15] 李光轩, 赵钟楠, 李原园, 等. 气候变化下西北内陆河典型流域出山径流变化归因分析 [J]. *水资源保护*, 2026, 42(1): 152-161.  
LI G X, ZHAO Z N, LI Y Y, et al. Attribution Analysis of mountainous runoff evolution in typical basins of northwest inland rivers under Climate Change [J]. *Water Resources Protection*, 2026, 42(1): 152-161. (in Chinese)
- [16] 黄雪扬, 吴欣, 崔鹏. 基于水土流失治理的渭河流域绿色基础设施网络构建与优化研究 [J]. *水土保持研究*, 2026, 33(3): 179-190.  
HUANG X Y, WU X, CUI P, et al. Study on Construction and Optimization of Green Infrastructure Network in Weihe River Basin Based on Soil Erosion Control [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2026, 33(3): 179-190. (in Chinese)
- [17] 毛荣鑫, 任雨婷, 陈建坤, 等. 渭河流域景观格局对水源涵养服务的影响 [J/OL]. *水生态学杂志*, 1-16 [2025-12-18]. <https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.202506110004>.  
MAO R X, REN Y T, CHENG J K, et al. The Impact of Landscape Patterns in the Weihe River Basin on Water Conservation Services [J/OL]. *Journal of Hydroecology*, 1-16 [2025-12-18]. <https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.202506110004>. (in Chinese)
- [18] 孙思奥, 汤秋鸿. 黄河流域水资源利用时空演变特征及驱动要素 [J]. *资源科学*, 2020, 42(12): 2261-2273.  
SUN S A, TANG Q H. Spatiotemporal Patterns and Driving Factors of Water Resource Use in the Yellow River Basin [J]. *Resources Science*, 2020, 42(12): 2261-2273. (in Chinese)
- [19] 姜秋香, 孙宇祥, 王子龙, 等. 基于突变理论和因子分析的水资源利用效率评价及驱动因素分析 [J/OL]. *水资源保护*, 1-13 [2025-12-18]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1356.TV.20250121.1454.012>.  
JIANG Q X, SUN Y X, WANG Z L, et al. Evaluation of Water Resource Utilization Efficiency and Analysis of Driving Factors Based on Mutation Theory and Factor Analysis [J/OL]. *Water Resources Protection*. 1-13 [2025-12-18]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1356.TV.20250121.1454.012>. (in Chinese)
- [20] 汪攀, 刘毅敏. Sen's斜率估计与Mann-Kendall法在设备运行趋势分析中的应用 [J]. *武汉科技大学学报*, 2014, 37(6): 454-457, 472.

- WANG P, LIU Y M. Application of Sen's Slope Estimator and Mann-Kendall Method in Equipment Operation Trend Analysis [J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2014, 37(6): 454-457, 472. (in Chinese)
- [21] 梁丽霞, 宋铮, 张忠扬, 等. 基于随机森林模型的祖厉河流域水沙模拟及归因分析 [J]. 人民黄河, 2025, 47(8): 90-95.
- LIANG L X, SONG Z, ZHANG Z Y, et al. Simulation and Attribution Analysis of Sediment and Water in the Zuli River Basin Based on a Random Forest Model [J]. Yellow River, 2025, 47(8): 90-95. (in Chinese)
- [22] 何毅, 蒋晓辉, 胡稀有, 等. 人类活动对黄河中游径流变化影响的定量归因——以窟野河流域为例 [J]. 西北大学学报(自然科学版), 2025, 55(4): 798-807.
- HE Y, JIANG X H, HU X Y, et al. Quantitative Attribution of Influence of Human Activities on Runoff Change in the Middle Reaches of the Yellow River: A Case Study of Kuye River Basin [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2025, 55(4): 798-807. (in Chinese)
- [23] 靳莉君, 马志瑾, 尹姍, 等. 近百年黄河流域两个连续枯水段的天气成因分析 [J]. 水利水运工程学报, 2026(1): 48-58.
- JIN L J, MA Z J, YIN S, et al. Comparative analysis of the weather causes of two consecutive low-flow periods in the Yellow River Basin over the past hundred years [J]. Hydro-Science and Engineering, 2026(1): 48-58. (in Chinese)
- [24] 童晓霞, 崔远来, 邵东国, 等. 递增式连续降雨条件下典型山区坡面径流产沙水动力学特征 [J]. 农业工程学报, 2024, 40(9): 88-97.
- TONG X X, CUI Y L, SHAO D G, et al. Hydrodynamic characteristics of runoff and sediment yield on the slopes in typical mountainous areas under incremental and continuous rainfall conditions [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(9): 88-97. (in Chinese)
- [25] 段雨佳, 何毅, 赵杰, 等. 人类活动对秦岭月河流域径流变化的影响分析 [J]. 干旱区研究, 2023, 40(4): 605-614.
- DUAN Y J, HE Y, ZHAO J, et al. Analysis of impact of human activities on runoff changes in Yue River Basin of the Qinling Mountains [J]. Arid Zone Research, 2023, 40(4): 605-614. (in Chinese)
- [26] 栾金凯, 马宁. 人类活动对径流的影响: 研究进展与挑战 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2025, 61(6): 969-983.
- LUAN J K, MA N. Impacts of Human Activities on Runoff: Advances and Challenges [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2025, 61(6): 969-983. (in Chinese)
- [27] 穆兴民, 马雪燕, 王双银, 等. 植被恢复下黄土高塬沟壑区的产流机制与模式 [J]. 人民黄河, 2024, 46(9): 42-49, 66.
- MU X M, MA X Y, WANG S Y, et al. Changes in Runoff Generation Patterns in the Hilly-Gully Region of the Loess Plateau Under Vegetation Restoration [J]. Yellow River, 2024, 46(9): 42-49, 66. (in Chinese)
- [28] 周惠成, 刘莎, 程爱民, 等. 跨流域引水期间受水水库引水与供水联合调度研究 [J]. 水利学报, 2013, 44(8): 883-891.
- ZHOU H C, LIU S, CHENG A M, et al. Joint Operation of Water Transfer-supply for the Reservoir in Intake Area During Inter-basin Water Transfer [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(8): 883-891. (in Chinese)
- [29] FENG X M, FU B J, PIAO S L, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits [J]. Nature Climate Change, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [30] LIANG W, BAI D, WANG F, et al. Quantifying the impacts of climate change and ecological restoration on streamflow changes based on a hydrological model in China's Loess Plateau [J]. Water Resources Research, 2015, 51(8): 6500-6519.
- [31] 刘会源. 黄土高原淤地坝建设对黄河水资源的影响预测 [J]. 中国水土保持, 2004(7): 32-34.
- LIU H Y. Prediction of the Impact of Loess Plateau Silt Dam Construction on Yellow River Water Resources [J]. Soil and Water Conservation in China, 2004(7): 32-34. (in Chinese)
- [32] WANG S, FU B, PIAO S, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes [J]. Nature Geoscience, 2016, 9(1): 38-41.

## Attribution of Runoff and Spatial Heterogeneity in the Weihe River Basin under Changing Environments

XIE Wenwei<sup>1</sup>, LIANG Lixia<sup>2</sup>, TAO Hu<sup>3</sup>, WANG Yibo<sup>3\*</sup>

(1. Gansu Provincial Institute of Soil and Water Conservation Science, Lanzhou 730000, China; 2. Department of Water Resources of Gansu Province, Lanzhou 730000, China; 3. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

---

**Abstract:** The Weihe River Basin, a typical semi-arid to semi-humid transition zone in the middle reaches of the Yellow River, exhibits runoff evolution that directly impacts regional water security and the ecological health of the Yellow River. Utilizing ERA5-Land reanalysis and socio-economic data, this study applies the Budyko water balance framework and a Random Forest model to systematically analyze the dominant mechanisms and spatial heterogeneity of runoff evolution from 2003 to 2024. The results reveal that:①Basin runoff displays a fluctuating downward trend (-1.525 mm/a) with significant spatial non-uniformity in its attenuation. ②Climatic warming and drying dominates runoff reduction, contributing 61.33% compared to 38.67% from human activities. ③The driving mechanism exhibits a pronounced "spatial dualistic structure"—while climate sets the baseline water volume, per capita GDP statistically surpasses natural factors as the primary explanatory variable, driven by high-intensity economic water consumption in the downstream Guanzhong Plain, whereas upstream mountainous areas remain precipitation-dominated. This study clarifies the spatial differentiation of the "Nature-Society" dualistic water cycle and proposes a zoned management strategy of "adaptive protection upstream and demand-side regulation downstream."

**Keywords:** Runoff attribution; Budyko hypothesis; Random Forest; Spatial heterogeneity; Weihe River Basin

(责任编辑:程 茜)