

基于 PLS-SEM 的渭河流域径流演变效应解耦

江善虎^{1,2}, 江 宏^{1,2}, 朱永卫^{1,2}, 崔 豪^{1,2}, 任立良^{1,2}

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要:为定量解耦气候变化、人类活动与植被动态等多因素对流域水循环演变的影响,构建了渭河流域水循环多要素影响解耦框架;利用偏最小二乘结构方程模型(PLS-SEM)、Pearson 相关分析与趋势分析法,解耦了 1982—2020 年渭河流域气候变化、人类活动、植被动态对渭河流域径流变化的直接和间接效应。结果表明:1982—2001 年渭河流域气候变化与人类活动对径流影响的综合效应呈现均衡态势,气候变化和人类活动对径流的综合效应值分别为 0.313、-0.315;2002—2020 年人类活动的综合效应值(-0.667)显著超越气候变化(0.319),成为流域径流演变的主导驱动因素;1982—2001 年径流减少的机制特征为降水主导、多因子协同,降水减少的直接效应与气温升高、植被恢复及人类活动的综合效应共同主导径流衰减过程;2002—2020 年径流增加的机制特征为降水主控、工程消减,降水显著增加是导致径流增加的主导因素,而工程调控的直接效应抑制了径流增加的趋势,导致径流仅呈现微弱的恢复态势。

关键词:气候变化;人类活动;植被动态;径流演变;PLS-SEM;渭河流域

中图分类号:P339 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)05-0223-08

Runoff evolution effect decoupling in the Wei River Basin based on PLS-SEM//JIANG Shanhu^{1,2}, JIANG Hong^{1,2}, ZHU Yongwei^{1,2}, CUI Hao^{1,2}, REN Liliang^{1,2} (1. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To quantitatively deconstruct the impacts of multiple factors, such as climate change, human activities, and vegetation dynamics, on the evolution of watershed water cycles, a decoupling framework for multi-factor influences on the water cycle in the Wei River Basin was constructed. Partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM), Pearson correlation analysis, and trend analysis methods were used to deconstruct the direct and indirect effects of climate change, human activities, and vegetation dynamics on runoff changes in the Wei River Basin from 1982 to 2020. The results indicated that from 1982 to 2001, the combined effects of climate change and human activities on runoff in the Wei River Basin exhibited a balanced situation, with the comprehensive effect value of climate change and human activities being 0.313 and -0.315, respectively. From 2002 to 2020, the comprehensive effect value of human activities (-0.667) significantly surpassed that of climate change (0.319), becoming the dominant driving factor of runoff evolution in the basin. From 1982 to 2001, the mechanism characteristics of runoff reduction are precipitation-dominated and multi-factor collaborative, with the direct effect of reduced precipitation and the combined effects of temperature increase, vegetation restoration, and human activities jointly driving the process of runoff attenuation. During the period from 2002 to 2020, the mechanism characteristics of runoff increase are precipitation-dominated and engineering-reduction, with the significant increase in precipitation being the dominant factor driving the rise in runoff. However, the direct effect of engineering regulation suppressed the rising trend of runoff, resulting in only a slight recovery trend in runoff.

Key words: climate change; human activity; vegetation dynamics; runoff evolution; PLS-SEM; the Wei River Basin

径流是陆地水文循环的重要组成部分,也是人类生产和生活用水的主要来源^[1]。近百年来,地球气候系统正经历着显著的变化,加之剧烈的人类活动影响,不同程度地改变了水文循环过程^[2-3]。为阐

明气候变化和人类活动对径流变化的影响机制,政府间气候变化专门委员会、世界气候研究计划、全球水系统计划等多个国际研究项目已经开展^[4]。在气候变化方面,降水和气温在流域水文和河流变化

基金项目:国家自然科学基金项目(52479009,U2243203)
作者简介:江善虎(1983—),男,教授,博士,主要从事变化环境下水文响应研究。E-mail:hik0216@163.com
通信作者:江宏(2001—),男,硕士研究生,主要从事变化环境下水文响应研究。E-mail:jhjhong@163.com

中起主导作用^[5]。人类活动通过影响土地利用类型、水利工程建设、工业用水和农业取水来影响径流^[6-8]。在不断变化的环境中,定量区分气候变化和人类活动的影响仍然是迫切需要解决的问题^[9]。

目前,国内外已开展了大量流域水循环演变的定量归因研究,归因方法主要包括基于水量平衡方程的敏感性分析和基于水文模型的数值模拟方法^[10-12]。例如,Zheng 等^[13]对黄河源区的研究表明,土地利用变化对径流减少的贡献率达 70% 以上,而气候变化影响不足 30%;王逸飞等^[14]基于 SWAT 模型模拟了黄河流域的水沙过程,发现人类活动是水沙俱减的主导原因;Poelmans 等^[15]通过降水径流模型模拟,发现比利时中部气候因素对径流的影响约为 30%;Saidi 等^[16]量化了人类活动及气候变化对意大利西北部阿尔卑斯河流域径流量的影响,发现气候变化对阿尔卑斯河流域径流减少的贡献率高达 85%。不同国家、不同流域的研究结果差异较大,表明解耦人类活动及气候变化对水文过程的影响需要在当地规模上进行研究。

黄河的径流变化呈现显著时空异质性,具有非平稳特征^[17]。渭河是黄河的最大支流,渭河流域长期以来受到人类活动的强烈影响,尤其是在农业和城市化进程方面,土地利用变化显著改变了流域的水文特征^[11,18]。然而,随着政府大力实施水土保持和生态恢复工程,如植被恢复、水库建设等,渭河流域的水土保持状况有了明显改善^[19],对流域水文循环产生了深远影响^[20]。由于渭河独特的地理位置和复杂的人类活动状况,其径流变化受到气候变化和人类活动的双重作用,且相互关系错综复杂^[21-22],解耦二者对渭河径流的影响,对于流域水资源合理利用、生态保护以及可持续发展具有重要意义。

近年来,偏最小二乘结构方程模型(partial least squares structural equation modeling, PLS-SEM)在计量经济学、社会科学和生态学等科学领域得到应用广泛^[23]。与传统的归因分析方法相比,PLS-SEM 可以处理复杂系统内的多元关系^[24],其中一个回归方程的响应变量可以作为另一个方程的自变量^[25],因此 PLS-SEM 能够区分直接效应(自变量与因变量之间)和间接效应(由其他变量介导的自变量与因变量之间的关系),并识别一个变量影响另一个变量的多种方式。并且,PLS-SEM 可以同时分析由多个变量所代表的一组概念之间的相互依存关系,清楚地表明每种关系的强弱^[26]。因此,本文利用 PLS-SEM 解耦渭河流域气候变化和人类活动对径流的影响,构建气候变化、人类活动、植被动态及径流相

互影响的结构模型,以期为渭河流域水资源合理利用提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

渭河是黄河最大的一级支流,发源于甘肃省渭源县鸟鼠山北侧,干流全长 818 km^[27]。渭河流域地理位置为 33° N ~ 38° N、104° E ~ 110° E,面积约 13.5 万 km²。华县水文站(34°35'N,109°46'E)为渭河干流出口控制站,集水面积约 10.6 万 km²,约占总流域面积 80%,能够有效反映流域主体水文过程。基于此,选取华县水文站以上区域作为研究区(图 1)。本文研究期为 1982—2020 年,2002 年我国政府全面启动了退耕还林还草工程,地区的植被覆盖度显著增加,有效遏制了水土流失状况,并改善了区域的水资源涵养功能,因此,将研究期划分为 1982—2001 年和 2002—2020 年两个时段。

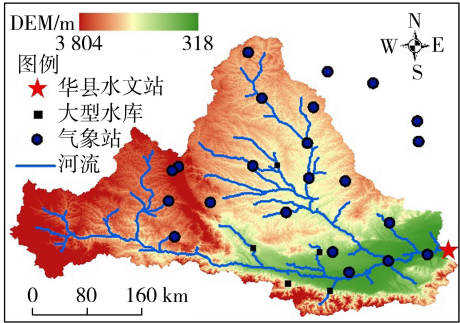


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

1.2 数据来源

1982—2020 年华县站流量及大中型水库资料来源于水利部黄河流域委员会水文局;1982—2020 年渭河流域气象站的气温、相对湿度以及日降水量等数据来源于中国气象局国家气候中心;1982—2020 年叶面积指数数据来源于全球植被指数建模和制图研究 LAI4g 数据集;梯田面积、淤地坝面积和水库建设资料来源于《黄河大典》以及全国第一次水利普查;取用水数据采用 Yan 等^[28]发布的 1982—2020 年全球人口和水资源的分布数据集。

2 研究方法

PLS-SEM 是一种先验统计技术,其模型基于假设的结构或已知的机制^[25]。在基于某些假设的理论模型中,潜在变量之间的因果关系可以使用相应的观测变量来衡量^[29]。PLS-SEM 由测量模型和结构模型两部分组成,测量模型描述潜在变量与观察变量之间的关系,结构模型反映潜在变量效应之间

关系的路径图,其中结构模型是 PLS-SEM 的核心。结构模型包括两种潜在变量:一种是影响他人的变量,称为解释变量;另一种能被其他因素所解释,称为结果变量。通常存在多个解释变量,不同解释变量之间存在互相作用,从而对结果变量产生直接效应和间接效应。直接效应值为解释变量直接指向结果变量的路径系数之和,间接效应值为解释变量间接指向结果变量的路径系数乘积之后的和,综合效应值为直接效应值与间接效应值之和。PLS-SEM 描述解释变量与结果变量之间关系的表达式为

$$\eta = \sum_{i=1}^n \beta_i \xi_i + \sum_{j=1}^m \beta'_j \xi_j + \zeta \tag{1}$$

式中: η 为结果变量; β_i 为第 i 个解释变量 ξ_i 直接作用在 η 上的路径系数; β'_j 为第 j 个解释变量 ξ_j 间接作用在 η 上的路径系数; n 为直接作用的数量; m 为间接作用的数量; ζ 为方程的残差项,表示模型中无法描述的部分。

潜在变量不能被直接观察,可基于一定的理论或假设,由一个或多个观察变量来构建,表达式为

$$\xi = x\Lambda_{x\xi} + \delta \tag{2}$$

$$\eta = y\Lambda_{y\eta} + \varepsilon \tag{3}$$

式中: ξ 为解释变量; x 为解释变量的观察变量; y 为结果变量的观察变量; $\Lambda_{x\xi}$ 为解释变量与其观察变量之间的关系; $\Lambda_{y\eta}$ 为结果变量与其观察变量之间的关系; δ, ε 为测量误差。

采用拟合优度^[30]作为 PLS-SEM 的检验指标,计算公式为

$$G = \sqrt{\overline{Q^2 R^2}} \tag{4}$$

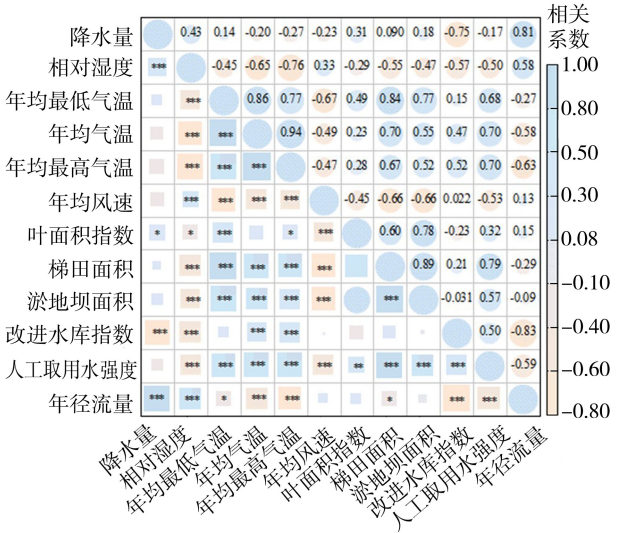
式中: $\overline{Q^2}$ 为构面交叉验证的共同性下的所有构面的 Stone-Geisser 检验值 Q^2 的平均值, Q^2 通过盲目过程的交叉验证获得; $\overline{R^2}$ 为所有内生变量的决定系数 R^2 的平均值; G 为拟合优度,根据 Vinzi 等^[31] 的研究, $G>0.5$ 表示模型能够较好地解释观测数据的变异性。

3 结果与分析

3.1 潜在变量的确定

选取 11 个驱动因素,采用 Pearson 相关分析^[32] 分析其与径流之间的相关关系,考虑测量的不确定性以及建模过程中小样本量的局限性,假设检验的最低显著性水平 p 设定为 0.10,以确保结果的稳健性和可靠性,结果如图 2 所示。其中,降水量、相对湿度、年均气温、年均最低气温、年均最高气温、年均风速采用泰森多边形法求得研究区平均值。为反映水库对径流拦蓄的影响,根据 López 等^[33] 提出的水

库指数,采用考虑淤积过程的改进水库指数表征水库对径流的影响,改进水库指数越大,表明上游水库群对径流形态的改变程度越大。叶面积指数与植物光合作用、蒸腾作用等水文过程密切相关,其变化能够显著影响降水入渗、地表蒸发和径流的产生,能较好地反映渭河流域水分可利用性与植被生长之间的关系。



注: * 表示 $p<0.1$, ** 表示 $p<0.05$, *** 表示 $p<0.01$ 。

图 2 驱动因素与径流的相关性分析结果
Fig. 2 Correlation analysis results between driving factors and runoff

由图 2 可见,1982—2020 年渭河流域多个驱动因素与径流存在显著的相关关系。降水量和相对湿度与径流之间呈显著正相关关系,表明降水量和相对湿度是影响径流变化的主要驱动因素。降水量的增加直接增强了水文补给,导致流域径流增加;相对湿度作为水汽储量的指示,与降水量共同作用,在较高湿度条件下,降水后更容易形成径流。此外,年平均气温和年平均最高气温与径流之间呈显著负相关关系,表明随着气温上升,蒸发和蒸腾作用增强,从而减少了地表径流的形成。年均气温上升可能导致水分的快速蒸发,尤其在干旱季节,减少了土壤水分的有效补给,从而抑制了径流的形成。在土地利用方面,梯田面积与径流呈负相关关系,表明梯田作为一种水土保持措施,通过改变土地表面形态、促进水分渗透,增强了土壤水分保持能力,有效减缓了降水后径流的形成。改进水库指数和人工取水强度与径流之间呈显著负相关关系,表明流域水库群的蓄水能力和人类活动与径流密切相关。改进水库指数较高时,水库的蓄水能力增强,部分降水被水库储存,导致流域内径流量减少;人工取水强度的增加则直接减少了可形成径流的水量,尤其在人类活动密集地区,过度利用水资源进一步抑制了径流的形

成。年均最低气温和风速与径流的相关性较低。综上,确定 PLS-SEM 中潜在变量为气候变化、人类活动、植被动态和径流。气候变化的观测变量为降水量、相对湿度、年均气温和年均最高气温;人类活动的观测变量为梯田面积、淤地坝面积、改进水库指数和人工取水强度;植被动态的观测变量为叶面积指数;径流的观测变量为年径流量。

为了测试可能解释气候变化、人类活动和植被动态对径流影响的假设路径,提出以下假设:①气候变化对水文特征施加强烈的直接(通过改变产流)和间接(通过影响植被生长)效应;②人类活动对水文特征施加强烈的直接效应(通过人工取水、蓄水工程减少径流量)和间接(通过改变下垫面条件和植被)效应;③植被冠层会重新分配降雨并通过地表覆盖(如枯枝和树叶)和地下根系影响径流生成机制。

3.2 潜在变量的趋势分析

为探究高强度人类活动对流域水循环演变的影响,采用简单线性回归模型^[34]对 1982—2001 年和 2002—2020 年两个时段的潜在变量进行趋势分析,

结果如图 3 所示,图中 R^2 为决定系数, k 为斜率。由图 3 可见,1982—2001 年降水量、相对湿度和年径流量呈下降趋势,而改进水库指数、人工取水强度和叶面积指数则呈上升趋势;2002—2020 年相对湿度和改进水库指数呈下降趋势,而降水量、人工取水强度、叶面积指数和年径流量则呈上升趋势。在两个时段,年均气温、年均最高气温、梯田面积和淤地坝面积均呈上升趋势。这表明,在不同时间尺度下,气候变化与人类活动对径流的影响方向和强度有所不同,且可能存在一定的相互促进或抵消关系。

3.3 PLS-SEM 解耦结果

潜在变量与其对应的观测变量之间的相关系数绝大多数都高于 0.90,表明观测变量的变异能够被潜在变量有效地捕获,观测变量能够准确地反映潜在变量的特征。在 1982—2001 年和 2002—2020 年,PLS-SEM 的拟合优度分别为 0.602 和 0.687,均大于 0.5,表征模型模拟效果良好。

对观测变量进行标准化处理,以消除量纲影响,进而利用 PLS-SEM 解耦气候变化、人类活动、植被

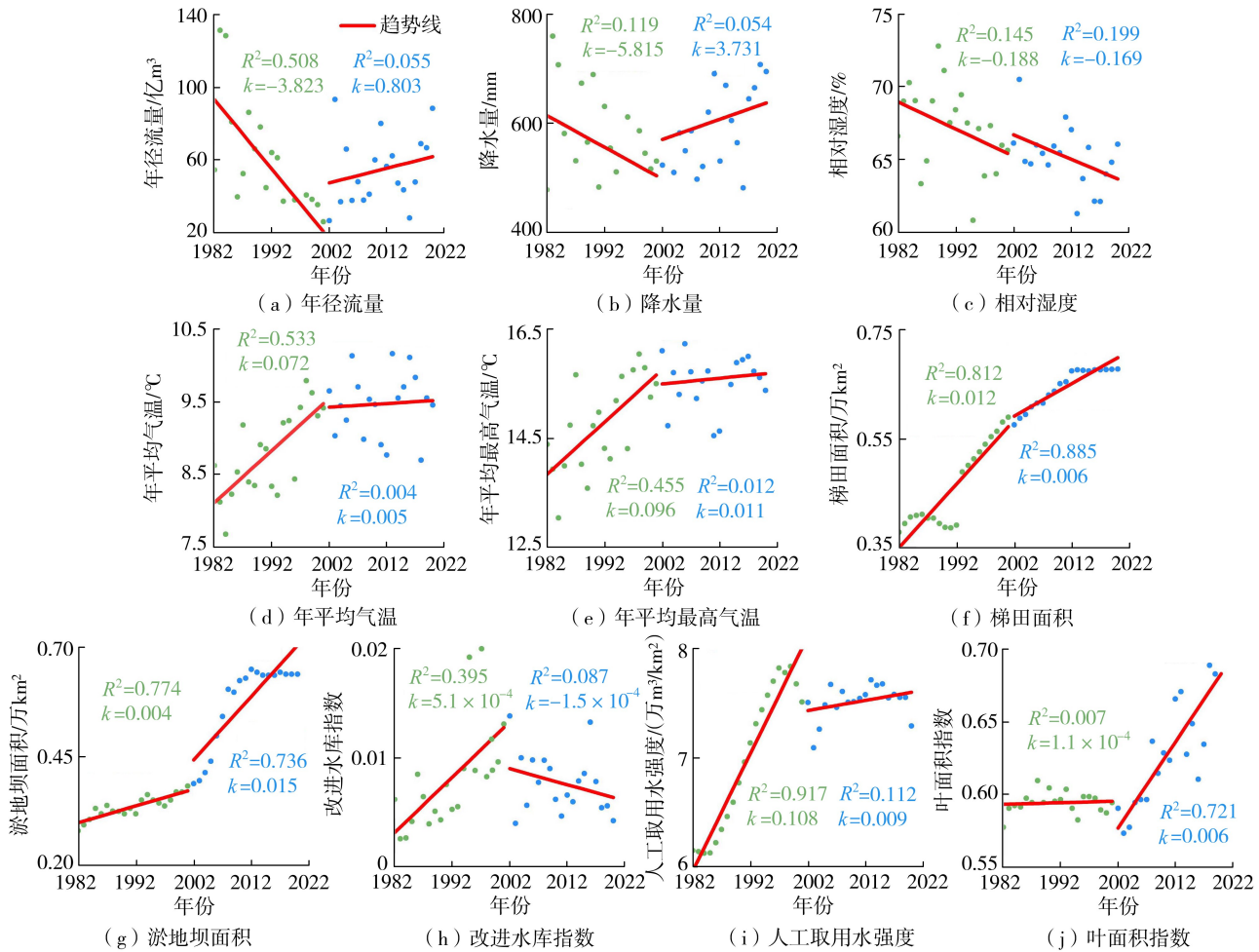


图 3 潜在变量的趋势分析结果

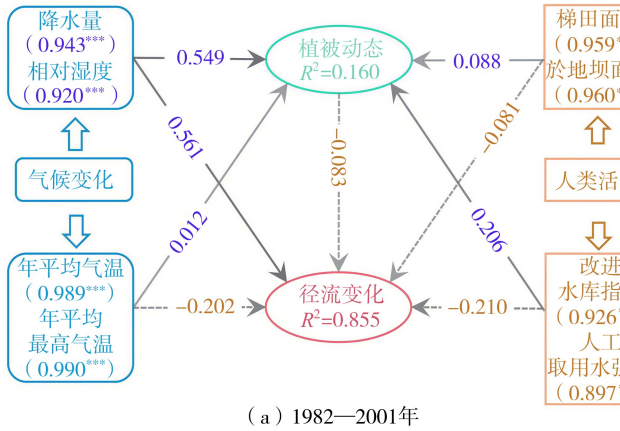
Fig. 3 Trend analysis results of latent variables

动态对渭河流域径流的影响,潜在在变量效应值见表 1,气候变化、人类活动对径流的直接效应为各观测变量指向径流的路径系数之和,间接效应为各观测变量通过植被指向径流的路径系数乘积之后的和。解耦结果表明,1982—2001 年气候变化、人类活动和植被动态共同解释了 85.5%的径流变化,2002—2020 年解释力提升至 94.5%,表明模型结果对研究时段具有较高的敏感性。

表 1 解释变量的效应值

时段	解释变量	直接效应	间接效应	综合效应
1982—2001 年	气候变化	0.359	-0.046	0.313
	人类活动	-0.291	-0.024	-0.315
	植被动态	-0.083		-0.083
2002—2020 年	气候变化	0.336	-0.017	0.319
	人类活动	-0.735	0.068	-0.667
	植被动态	0.160		0.160

图 4 为 PLS-SEM 解耦结果,图中实线箭头表示正相关关系,虚线箭头表示负相关关系,箭头上的数字为路径系数。由图 4 可见,1982—2001 年,气候变化对径流的直接效应(效应值为 0.359)强于人类活动(效应值为 -0.291)及植被动态(效应值为 -0.083),其通过植被的间接效应(效应值为 -0.046)亦高于人类活动(效应值为 -0.024),其中降水量与相对湿度的直接与间接效应均远超气温因子。人类活动直接效应以水利工程调控(改进水库指数和人类取用水强度,效应值为 -0.210)为主导,其间接效应(效应值为 -0.017)亦强于水土保持工程(梯田面积和淤地坝面积,效应值为 -0.007)。综合效应呈现出气候变化(效应值为 0.313)与人类活动(效应值为 -0.315)均衡态势格局。2002 年后格局发生显著转变,2002—2020 年,人类活动直接效应强度(效应值为 -0.735)跃居首位,远超气候变化(效应值为 0.336)及植被动态(效应值为 0.160),



其间接效应(效应值为 0.068)亦逆转气候变化(效应值为 -0.017);水利工程直接效应(效应值为 -0.694)仍居主导,但水土保持工程的间接效应(效应值为 0.123)显著超越水利工程(效应值为 -0.055),成为最重要间接影响。人类活动综合效应(效应值为 -0.667)较气候变化(效应值为 0.319)显著提升,成为渭河流域径流演变的主要驱动因素。

4 讨论

4.1 渭河流域径流演变的驱动因素

渭河流域径流演变的驱动机制呈显著的阶段性特征,揭示了自然-社会耦合系统的复杂响应过程。通过 PLS-SEM 解耦气候变化、人类活动与植被动态对径流的综合影响,发现 2002 年作为关键转折点,人类活动的影响强度跃升为径流演变的主导驱动因素。这一现象与全球“人类世”水文特征的演变规律高度契合,即人类干预逐渐超越自然气候波动成为流域水文过程的核心控制力。具体而言,1982—2001 年气候变化与人类活动的综合效应呈现均衡态势,降水量是渭河流域径流变化的最大影响因子,这与毕彩霞等^[35]在渭河的研究结论一致。2002 年后人类活动为主要驱动因素,其主要通过三重路径重塑水文过程:①水利工程直接调控水量时空分配(综合效应 -0.749);②梯田-淤地坝系统延长水文响应时间(直接效应值为 -0.041);③植被恢复改变地表能量分配(效应值为 0.160),这种转变与黄河流域整体水文响应模式一致^[36]。值得注意的是,人类活动不仅对径流产生影响,也在一定程度上通过植被影响区域气候。降水量对植被动态的路径系数由 0.549 转变为 -0.123,表明渭河流域在大规模人类活动干预之下降水量与植被之间的关系发生了转变,由降雨过程促进植被恢复转变为植被恢复促进

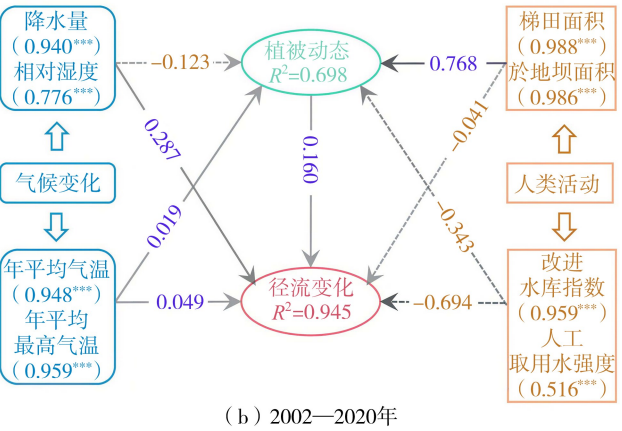


图 4 PLS-SEM 解耦结果
Fig. 4 PLS-SEM decoupling results

降雨过程,这是植被对区域降水的反馈效应,与张宝庆等^[37]在黄土高原区的研究结果一致。究其原因,一方面由于人类大规模植树造林,提高了植被覆盖度,导致地表反照率降低,地表净辐射增加,进而增强局地对流活动,降水量增加;另一方面人工林深层根系会改变土壤水分运移路径,降水入渗深度增加,导致地下径流占比提升,部分抵消了气温上升引发的蒸发加剧效应。

4.2 不确定性及局限性

本文对渭河流域的径流演变机制研究存在多维度的学术局限性需予阐明。首先,研究结论对时间尺度选择具有敏感性,不同时间分辨率下气候要素与人类活动对径流水文过程的驱动强度及作用路径呈现显著异质性^[38],这可能导致影响机制的误判。其次,1982—2001 年模型解释力相对不足,主要归因于长序列水文气象观测数据的可获取性约束。需特别指出的是,当前 PLS-SEM 架构虽已整合主要驱动要素,但对土壤物理属性、地下水-地表水交互机制、植被根系水文学效应等潜在关键因子尚未建立参数化方案,这可能削弱水文过程模拟的物理机制完备性。另外,忽视年内水文过程的动态异质性可能引致关键驱动因素识别偏差,研究仅聚焦年际尺度分析,未能解耦降水再分配、农业灌溉周期、生态需水波动等具有显著季节特征的驱动要素,这种季节尺度解析的缺失可能掩盖水循环关键节点的调控机制。

5 结 论

- a. 基于 PLS-SEM 在渭河流域实现了气候变化、人类活动与植被动态对径流演变驱动机制的定量解耦。1982—2020 年人类活动对径流的调控作用显著增强,呈现代际变化特征。人类活动的综合效应系数从 1982—2001 年的-0.315 显著提升至 2002—2020 年的-0.667,超过了同期气候变化综合效应(效应值由 0.313 提升至 0.319),表明高强度的人类活动已成为渭河流域径流演变的主导驱动因素。
- b. 1982—2001 年渭河流域径流减少的机制特征为降水主导、多因子协同。在此阶段,径流减少呈现明显的降水主导特征,其直接效应(效应值为 0.529)较为显著,叠加相对湿度的下降、气温升高、植被恢复以及人类活动的综合效应,形成了复杂的径流衰减过程。
- c. 2002—2020 年渭河流域径流增加的机制特征为降水主控、工程消减。在此阶段,降水量的显著增加(直接效应值为 0.269)是导致径流增加的主导因素,而人类活动的综合效应(效应值为-0.667)则抑制了径流的增加趋势,从而导致径流仅呈现微弱

的恢复态势。

参考文献:

[1] ALLEN M R, INGRAM W J. Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle[J]. Nature, 2002, 419 (6903): 224-232.

[2] OKI T, KANAE S. Global hydrological cycles and world water resources [J]. Science, 2006, 313 (5790): 1068-1072.

[3] 丁一汇. 人类活动与全球气候变化及其对水资源的影响 [J]. 中国水利, 2008 (2): 20-27. (DING Yihui. Human activity and the global climate change and its impact on water resources [J]. China Water Resources, 2008 (2): 20-27. (in Chinese))

[4] 宋晓猛, 张建云, 占车生, 等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展 [J]. 水利学报, 2013, 44 (7): 779-790. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, ZHAN Chesheng, et al. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44 (7): 779-790. (in Chinese)) .

[5] 崔豪, 江善虎, 任立良, 等. 基于四元驱动的非平稳水文干旱评估方法 [J]. 水资源保护, 2024, 40 (1): 71-78. (CUI Hao, JIANG Shanhu, REN Liliang, et al. A non-stationary hydrological drought assessment method based on four-source driven [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (1): 71-78. (in Chinese))

[6] 郑帅, 翁白莎, 严登华, 等. 基于水循环全过程的旱涝级联效应研究框架 [J]. 水资源保护, 2024, 40 (1): 60-70. (ZHENG Shuai, WENG Baisha, YAN Denghua, et al. Research framework of drought-food cascade effect based on water cycle processes [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (1): 60-70. (in Chinese))

[7] 江善虎, 刘亚婷, 任立良, 等. 变化环境下渭河流域生态水文情势演变归因研究 [J]. 水资源保护, 2022, 38 (6): 9-14. (JIANG Shanhu, LIU Yating, REN Liliang, et al. Attribution analysis of eco-hydrological regime evolution in the Weihe River Basin under changing environment [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (6): 9-14. (in Chinese))

[8] 叶婷, 石朋, 钟华, 等. 基于 Budyko 假设和微分方程的淮河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))

[9] 李发文, 陶仁杰. 变化环境下子牙河流域水文过程影响要素分析 [J]. 水资源保护, 2023, 39 (5): 9-17. (LI Fawen, TAO Renjie. Analysis of factors influencing

- hydrological processes in the Ziya River Basin under changing environment [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(5): 9-17. (in Chinese))
- [10] 任立良, 沈鸿仁, 袁飞, 等. 变化环境下渭河流域水文干旱演变特征剖析 [J]. *水科学进展*, 2016, 27(4): 492-500. (REN Liliang, SHEN Hongren, YUAN Fei, et al. Hydrological drought characteristics in the Weihe catchment in a changing environment [J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(4): 492-500. (in Chinese))
- [11] JIANG Shanhu, ZHU Yongwei, REN Liliang, et al. A complementary streamflow attribution framework coupled climate, vegetation and water withdrawal [J]. *Water Resources Management*, 2023, 37(12): 4807-4822.
- [12] 王宣宣, 刘欢, 胡鹏, 等. 基于水量平衡原理和 Budyko 假设的强人类活动干扰下西辽河流域径流衰减归因分析 [J]. *水资源保护*, 2024, 40(6): 165-172. (WANG Xuanxuan, LIU Huan, HU Peng, et al. Attribution analysis of runoff attenuation in the Xiliao River Basin under significant human interference based on water balance principle and Budyko hypothesis [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(6): 165-172. (in Chinese))
- [13] ZHENG Hongxing, ZHANG Lu, ZHU Ruirui, et al. Responses of streamflow to climate and land surface change in the headwaters of the Yellow River Basin [J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(7): w00A19.
- [14] 王逸飞, 武磊, 杨致远, 等. 甘肃黄河流域水沙动态及其归因分析 [J]. *水资源保护*, 2025, 41(1): 131-139. (WANG Yifei, WU Lei, YANG Zhiyuan, et al. Runoff and sediment dynamics and attribution analysis in the Yellow River Basin of Gansu Province [J]. *Water Resources Protection*, 2025, 41(1): 131-139. (in Chinese))
- [15] POELMANS L, VAN ROMPAEY A, NTEGEKA V, et al. The relative impact of climate change and urban expansion on peak flows: a case study in central Belgium [J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25(18): 2846-2858.
- [16] SAIDI H, DRESTI C, MANCA D, et al. Quantifying impacts of climate variability and human activities on the streamflow of an Alpine river [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(19): 690.
- [17] 江善虎, 任明明, 章二子, 等. 基于非平稳 GEV 模型的黄河源区枯季径流演变特征分析 [J]. *河海大学学报 (自然科学版)*, 2023, 51(2): 1-7. (JIANG Shanhu, REN Mingming, ZHANG Erzi, et al. Study on evolution characteristics of dry season runoff using a non-stationary GEV model in Source Region of the Yellow River [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2023, 51(2): 1-7. (in Chinese))
- [18] 李烁阳, 刘小燕, 杨贵羽, 等. 土地利用变化对渭河流域水文过程的影响 [J]. *水土保持研究*, 2021, 28(3): 133-140. (LI Shuoyang, LIU Xiaoyan, YANG Guiyu, et al. Analysis of the impact of land use change on runoff in the Weihe River Basin from the perspective of hydrologic factor variation [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(3): 133-140. (in Chinese))
- [19] WEI Chong, DONG Xiaohua, YU Dan, et al. An alternative to the Grain for Green Program for soil and water conservation in the upper Huaihe River Basin, China [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2022, 43: 101180.
- [20] ZHAO Gaolei, TIAN Shimin, LIANG Shuai, et al. Hierarchical methodology framework for assessing dynamic evolution trends and driving mechanisms of water conservation in the Yellow River Basin, China [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 26304.
- [21] MENG Fanhao, LIU Tie, HUANG Yue, et al. Quantitative detection and attribution of runoff variations in the Aksu River Basin [J]. *Water*, 2016, 8(8): 338.
- [22] 周祖昊, 刘佳嘉, 严子奇, 等. 黄河流域天然河川径流量演变归因分析 [J]. *水科学进展*, 2022, 33(1): 27-37. (ZHOU Zuhao, LIU Jiajia, YAN Ziqi, et al. Attribution analysis of the natural runoff evolution in the Yellow River Basin [J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(1): 27-37. (in Chinese))
- [23] VINZI V E, TRINCHERA L, AMATO S. PLS path modeling: from foundations to recent developments and open issues for model assessment and improvement [M] // VINZI V E, CHIN W W, HENSELER J, et al. *Handbook of Partial Least Squares*. Berlin: Springer, 2010: 47-82.
- [24] 李中恺, 李小雁, 周沙, 等. 土壤-植被-水文耦合过程与机制研究进展 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2022, 52(11): 2105-2138. (LI Zhongkai, LI Xiaoyan, ZHOU Sha, et al. A comprehensive review on coupled processes and mechanisms of soil-vegetation-hydrology, and recent research advances [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2022, 52(11): 2105-2138. (in Chinese))
- [25] PEARL J. The causal mediation formula: a guide to the assessment of pathways and mechanisms [J]. *Prevention Science*, 2012, 13(4): 426-436.
- [26] SHIPLEY B. A new inferential test for path models based on directed acyclic graphs [J]. *Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal*, 2000, 7(2): 206-218.
- [27] 王孟浩, 江善虎, 任立良, 等. 渭河流域热浪事件影响下的骤旱评估 [J]. *水利发展研究*, 2023, 23(9): 21-28. (WANG Menghao, JIANG Shanhu, REN Liliang, et al. Evaluation of flash drought under the impact of heat waves events in the Weihe River Basin [J]. *Water Resources Development Research*, 2023, 23(9): 21-28. (in Chinese))
- [28] YAN Denghua, ZHANG Xin, QIN Tianling, et al. A data set of distributed global population and water withdrawal from 1960 to 2020 [J]. *Scientific Data*, 2022, 9(1): 640.
- [29] 李文琦, 项琦, 解雪峰, 等. 互花米草入侵对杭州湾滨海湿地土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响 [J]. *环境科*

- 学,2023,44(5):2735-2745. (LI Wenqi, XIANG Qi, XIE Xuefeng, et al. Effect of *spartina alterniflora* invasion on soil C:N:P stoichiometry in coastal wetland of Hangzhou Bay [J]. Environmental Science, 2023, 44 (5): 2735-2745. (in Chinese))
- [30] MAZIRIRI E T, MADINGA N W. Data to model the prognosticators of luxury consumption: a partial least squares-structural equation modelling approach (PLS-SEM)[J]. Data in Brief, 2018, 21: 753-757.
- [31] VINZI V E, TRINCHERA L, AMATO S. Handbook of partial least squares: concepts, methods and applications [M]. Berlin:Springer Verlag, 2009.
- [32] SONG M, JEONG J, KUMI L, et al. Analysis of the effect of outdoor thermal comfort on construction accidents by subcontractor types [J]. Sustainability, 2024, 16 (12): 4906.
- [33] LÓPEZ J, FRANCÉS F. Non-stationary flood frequency analysis in continental Spanish rivers, using climate and reservoir indices as external covariates[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013, 17(8): 3189-3203.
- [34] SU Yongxian, CHEN Xiuzhi, LI Yong, et al. China's 19-year city-level carbon emissions of energy consumptions, driving forces and regionalized mitigation guidelines[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 35: 231-243.
- [35] 毕彩霞, 穆兴民, 赵广举, 等. 渭河流域气候变化与人类活动对径流的影响[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11 (2): 33-38. (BI Caixia, MU Xingmin, ZHAO Guangju, 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. (in Chinese))
- [36] 王国庆, 张建云. 环境变化的径流效应研究进展及黄河水源涵养区研究展望[J]. 水资源保护, 2024, 40(2): 1-8. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun. Research progress on runoff effects of environmental changes and prospects for research on the Yellow River water source conservation area[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(2): 1-8. (in Chinese))
- [37] 张宝庆, 田磊, 赵西宁, 等. 植被恢复对黄土高原局地降水的反馈效应研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51 (7): 1080-1091. (ZHANG Baoqing, TIAN Lei, ZHAO Xining, et al. Feedbacks between vegetation restoration and local precipitation over the Loess Plateau in China [J]. Scientia Sinica Terrae, 2021, 51 (7): 1080-1091. (in Chinese))
- [38] JI Lin, DUAN Keqin. What is the main driving force of hydrological cycle variations in the semiarid and semi-humid Weihe River Basin, China? [J]. Science of The Total Environment, 2019, 684: 254-264.

(收稿日期: 2025-03-03 编辑: 王芳)

(上接第 179 页)

- [25] 陈建国, 周文浩, 孙高虎. 论黄河小浪底水库拦沙后期的运用及水沙调控[J]. 泥沙研究, 2016(4): 1-8. (CHEN Jianguo, ZHOU Wenhao, SUN Gaohu. Studies on operation scheme and water-sediment regulation of Xiaolangdi reservoir[J]. Journal of Sediment Research, 2016(4): 1-8. (in Chinese))
- [26] 郜国明, 李新杰, 马迎平. 小浪底水库生态调度的内涵、目标及措施[J]. 人民黄河, 2014, 36(9): 76-79. (GAO Guoming, LI Xinjie, MA Yingping. Research on ecological scheduling of Xiaolangdi reservoir [J]. Yellow River, 2014, 36(9): 76-79. (in Chinese))
- [27] 陈秀秀, 叶盛, 洪艳艳, 等. 黄河骨干水库水沙调度的目标函数构建和应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(3): 727-739. (CHEN Xiuxiu, YE Sheng, HONG Yanyan, et al. The construction and application of objective function for water and sediment operation of major reservoirs in the Yellow River[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, 28(3): 727-739. (in Chinese))
- [28] 李洁玉, 李航, 王远见, 等. 黄河水沙调控多目标协同模型构建及应用[J]. 水科学进展, 2023, 34(5): 708-718. (LI Jieyu, LI Hang, WANG Yuanjian, et al. Construction and application of a multi-objective collaborative model of water and sediment regulation in the Yellow River[J]. Advances in Water Science, 2023, 34 (5): 708-718. (in Chinese))
- [29] 郑德凤, 高敏, 李钰, 等. 基于 GIS 的大连市暴雨洪涝灾害综合风险评估[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 1-8. (ZHENG Defeng, GAO Min, LI Yu, et al. Comprehensive risk assessment of rainstorm-flood disaster in Dalian City based on GIS[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50 (3): 1-8. (in Chinese))
- [30] 杨卓媛, 黄宇云, 夏函, 等. 水利新质生产力评价方法及应用[J]. 水资源保护, 2025, 41(1): 92-98. (YANG Zhuoyuan, HUANG Yuyun, XIA Han, et al. Evaluation method and application of new quality productive forces of water conservancy[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(1): 92-98. (in Chinese))
- [31] 黄冬菁, 李一平, 崔广柏, 等. 基于水文-水力-生境分析的河道基本生态流量计算方法[J]. 水资源保护, 2024, 40(1): 142-148. (HUANG Dongjing, LI Yiping, CUI Guangbo, et al. Calculation method of basic instream ecological flow based on hydrological-hydraulic-habitat analysis[J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (1): 142-148. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-04-01 编辑: 彭桃英)