

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2026.01.035

CSTR:32310.14.stbcbx.2026.01.035

胡玥灿, 官云兰, 魏泽锋, 等. 黄土高原碳水复合利用效率时空演变及其驱动机制[J]. 水土保持学报, 2026, 40(1): 340-351.

HU Yuecan, GUAN Yunlan, WEI Zefeng, et al. Spatio-temporal evolution of carbon-water compound use efficiency on Loess Plateau and its driving mechanisms[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(1): 340-351.

黄土高原碳水复合利用效率时空演变及其驱动机制

胡玥灿¹, 官云兰^{1,2,3}, 魏泽锋^{1,2}, 王淑婷¹

(1. 东华理工大学测绘与空间信息工程学院, 南昌 330013; 2. 东华理工大学自然资源部环鄱阳湖区域矿山环境监测与治理重点实验室, 南昌 330013; 3. 江西省流域生态过程与信息重点实验室, 南昌 330013)

摘要: [目的] 为明确黄土高原生态系统碳水复合利用效率(COM)的时空演变特征及其驱动机制。[方法] 以黄土高原为研究对象, 基于改进的CASA模型模拟区域内的净初级生产力, 并计算2002—2022年COM, 分析碳水利用效率的时空分布特征及其变化趋势; 采用最优参数地理探测器(OPGD)和偏最小二乘结构方程模型(PLS-SEM)探讨COM的驱动方式及影响路径。[结果] 1) 改进的CASA模型有效提升NPP估算精度(R^2 由0.53上升至0.63)。2) 2002—2022年, 黄土高原COM整体呈改善趋势, 改善区域整体占比87.8%。3) 降水量(Pre)、水汽压差(VPD)和地表温度(LST)对COM的解释力最强, 尤其是LST&Pre、Pop&Pre和Pop&VPD的交互作用最为显著。4) 地形、气候和人类活动对潜在变量的总影响分别为0.264、0.805和0.014, 其中气候直接影响显著(0.800), 地形通过间接路径(0.459)使总影响转负为正, 人类活动影响相对有限。[结论] 气候是影响黄土高原COM的主导因子, 地形通过间接路径发挥重要调控作用, 人类活动则主要通过交互作用影响COM。研究结果可为提升资源利用效率和促进区域生态系统可持续管理提供理论支持与方法参考。

关键词: 碳水复合利用效率(COM); 改进CASA模型; 时空演变; 驱动机制

中图分类号: Q948.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)01-0340-12

Spatio-temporal Evolution of Carbon-Water Compound Use Efficiency on Loess Plateau and its Driving Mechanisms

HU Yuecan¹, GUAN Yunlan^{1,2,3}, WEI Zefeng^{1,2}, WANG Shuting¹

(1. School of Surveying and Geoinformation Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;

2. Key Laboratory of Mine Environmental Monitoring and Improving around Poyang Lake, Ministry of

Natural Resources, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 3. Key Laboratory of

Watershed Ecological Processes and Information in Jiangxi Province, Nanchang 330013, China)

Abstract: [Objective] To clarify the spatiotemporal evolution characteristics of the carbon-water compound use efficiency (COM) and its driving mechanisms in the Loess Plateau ecosystem. [Methods] Taking the Loess Plateau as the study area, the net primary productivity (NPP) was simulated using an improved Carnegie-Ames-Stanford approach (CASA) model, and the COM for 2002—2022 was calculated to analyze its spatiotemporal distribution and variation trends. The optimal parameters-based geographical detector (OPGD) and partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM) were further employed to investigate the driving mechanisms and influence pathways of COM. [Results] 1) The improved CASA model significantly enhanced the NPP estimation accuracy, with R^2 improved from 0.53 to 0.63. 2) From 2002 to 2022, COM on the Loess Plateau exhibited an overall improvement, with 87.8% of the area showing positive change. 3) Precipitation (Pre), vapor pressure deficit (VPD), and land surface temperature (LST) had the strongest explanatory power for COM.

收稿日期: 2025-06-25

修回日期: 2025-09-07

录用日期: 2025-10-14

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-10-31

资助项目: 江西省研究生创新专项(YC2024-S487); 自然资源部环鄱阳湖区域矿山环境监测与治理重点实验室开放基金项目(MEMI-2023-15)

第一作者: 胡玥灿(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事生态环境遥感研究。E-mail: hyc021647@163.com

通信作者: 官云兰(1975—), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事摄影测量与遥感、GIS的教学与科研工作。E-mail: ylguan@ecut.edu.cn

http://stbcbx.alljournal.com.cn

Notably, the interactions of LST&Pre, Pop&Pre, and Pop&VPD were the most significant. 4) The total effects of terrain, climate, and human activities on potential variables were 0.264, 0.805, and 0.014, respectively. Among them, climate had a significant direct effect (0.800), terrain turned the total effect from negative to positive through indirect pathways (0.459), and the influence of human activities was relatively limited. [Conclusion] Climate is the dominant factor affecting COM on the Loess Plateau, terrain plays a key regulatory role through indirect pathways, and human activities mainly influence COM through interactions. The findings provide theoretical support and methodological reference for improving resource use efficiency and promoting sustainable ecosystem management in the region.

Keywords: carbon-water compound use efficiency (COM); improved CASA model; spatio-temporal evolution; driving mechanism

Received: 2025-06-25

Revised: 2025-09-07

Accepted: 2025-10-14

Online(www.cnki.net): 2025-10-31

生态系统是生物群落与生存环境构成的动态平衡体系,其演变受碳水循环驱动。碳水利用效率是表征陆地生态系统碳-水循环的关键指标^[1],对于理解陆地生态系统功能意义重大。在碳水循环中,植被作为生态系统物质能量交换的核心,其碳固存与水分利用受碳利用效率(carbon use efficiency, CUE)和水利用效率(water use efficiency, WUE)调控,二者分别从能量转化与资源权衡角度反映植被对环境的适应性。CUE指植被用于构建生物量的碳相对于总固定碳量的比例,可反映气候变化对植被碳固存潜力的作用关系^[2]。WUE指生态系统每消耗一个单位的水分所生产的干物质的量^[3],反映水分限制植被固碳能力和生产力的能力。在气候变化与人类活动的双重胁迫下,生态系统平衡面临严峻挑战,探究生态系统碳水利用效率及其耦合机制,已成为生态研究的重要方向。现有研究^[4]多聚焦于单一碳/水利用效率的时空分异特征,难以揭示复杂环境下的碳水耦合关系。WANG等^[5]提出的碳水复合利用效率(carbon-water compound use efficiency, COM)通过整合土壤湿度、植物生物量、碳同化和呼吸作用等关键因素,与单一指标相比,能综合评估生态系统对多因子响应,为区域生态恢复成效评估提供新视角^[6]。尽管该指标在理论上具有优势,但在应用中仍面临 2 个挑战:一是如何在区域尺度上提高 COM 估算精度;二是如何系统识别 COM 驱动机制。

在估算碳水复合利用效率时,净初级生产力(net primary productivity, NPP)是关键输入之一。传统 CASA (carnegie-ames-stanford approach) 模型中 NDVI 存在饱和效应且水分胁迫系数对环境动态响应不足^[7-8],导致 NPP 及 COM 计算精度受限。现有研究多对 CASA 模型参数进行改进,如利用地形与植被类型调节 ϵ_{\max} 提高山区 NPP 的模拟准确性^[9],或改进太阳辐射参数的计算方法以提升 NPP 模拟精

度^[10],在水分约束突出的干旱与半干旱地区,如何进一步提高 COM 的估算可靠性仍是亟待解决的问题。

驱动机制分析是揭示碳水复合效率时空演变和空间分异的关键,对提升生态管理水平意义重大。在驱动机制研究层面,已有方法虽然各具优势但难以深入揭示兼顾全面性。地理探测器能够识别因子的空间解释力及交互作用,但依赖于尺度和分层的人工设定,且难以揭示变量间的因果路径^[11];偏最小二乘结构方程模型(partial least squares structural equation modeling, PLS-SEM)则可量化直接与间接效应,理清作用链条,但在非线性关系和交互效应识别方面存在不足。单一方法往往难以完整揭示 COM 的复杂驱动过程。

针对上述问题,本研究在传统 CASA 模型的基础上引入基于核方法的 kNDVI 替代归一化差值植被指数 NDVI 优化光合有效辐射的比例(fraction of photosynthetically active radiation, FPAR),该指数在多种生态系统与气候条件下鲁棒性更高,能减弱植被指数与植被覆盖关系中的非线性影响^[12]。同时,引入地表水分指数(land surface water index, LSWI)优化水分胁迫系数。LSWI 对土壤湿度和植被质量分数敏感,在干旱与半干旱生态系统中可有效提升对湿度的模拟精度,准确反映研究区地表湿润情况^[13]。最优参数地理探测器(optimal parameters-based geographical detector, OPGD)在传统地理探测器的基础上通过优化尺度和分层方式,提高解释力与交互作用识别的精度,能够有效捕捉非线性关系^[14];PLS-SEM 适合刻画因子的直接与间接效应,揭示因果路径^[15]。因此,本研究将 OPGD 和 PLS-SEM 相结合进行驱动机制研究,能够互补不足,兼顾非线性交互与因果链条的解析,从而更全面地识别自然与人为因素对 COM 的驱动机制。

黄土高原作为全球水土流失最严重的区域之一,经过多年生态治理后,大规模生态工程已显著改善区域植被与生态功能,成为研究人类干预下生态系统演变的重要区域,但区域内碳水关系复杂,资源协调利用机制尚不明晰。本研究通过改进 FPAR 与水分胁迫系数优化 CASA 模型,提升 NPP 估算精度,计算并揭示 2002—2022 年黄土高原碳利用效率(CUE)、水利用效率(WUE)及碳水复合利用效率(COM)的时空演变规律;采用最优参数地理探测器模型(OPGD)与偏最小二乘结构方程模型(PLS-SEM),深入解析自然与人为因素对 COM 的驱动机制。研究有助于深化对典型生态脆弱区碳水耦合过程的认知,可为优化生态治理策略、区域生态系统的科学管理与可持续发展提供支撑。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

黄土高原(33°43′~41°16′N, 100°54′~114°33′E)地处我国第二级地貌阶梯,是世界上面积最大、土层最厚的风积黄土分布区,主要由山西高原、陕甘晋高原、陇中高原、鄂尔多斯高原和河套平原组成^[16],属干旱-半干旱大陆性季风气候,多年平均气温为 7.3℃,多年平均降水量为 447 mm。长期高强度农业开发导致原生植被破坏,土壤侵蚀模数高达 15 000 t/(km²·a),属极强度侵蚀区,研究区概况见图 1。

表 1 数据介绍

Table 1 Data description

数据类型	数据名称	简称	数据集名称/m	分辨率/m	来源
	遥感数据	—	MODIS/061/MOD13Q1	500	
NPP 计算数据	地表水分指数	LSWI	MODIS/061/MOD09A1	500	Google Earth Engine 平台数据集
	气候数据	—	IDAHO_EPSCOR/TERRACLIMATE	4 638	
碳水通量数据	总初级生产力	GPP	CAS/IGSNRR/PML/V2_v018	500	Google Earth Engine 平台数据集
	蒸散发	ET			
	土地利用	CLCD	—	30	Zenodo 数据平台
	水汽压差	VPD	ECMWF/ERA5_LAND/MONTHLY_AGGR	4 638	Google Earth Engine 平台数据集
	土壤湿度	Soil	ECMWF/ERA5_LAND/MONTHLY_AGGR	4 638	Google Earth Engine 平台数据集
驱动因子数据	DEM	DEM	ASTER GDEM	30	地理空间数据云
	人口密度	Pop	—	1 000	Zenodo 数据平台
	国内生产总值	GDP	—	1 000	资源环境科学数据注册与出版系统
	夜间灯光数据	NTL	—	500	Harvard Dataverse

1.3 改进 CASA 模型计算 NPP

CASA 模型强调气候条件和植被本身的光能利用效率,在估算陆地生态系统 NPP 中应用广泛。计算公式^[17]:

$$NPP(x, t) = SOL(x, t) \times FPAR(x, t) \times 0.5 \times \epsilon(x, t) \quad (1)$$

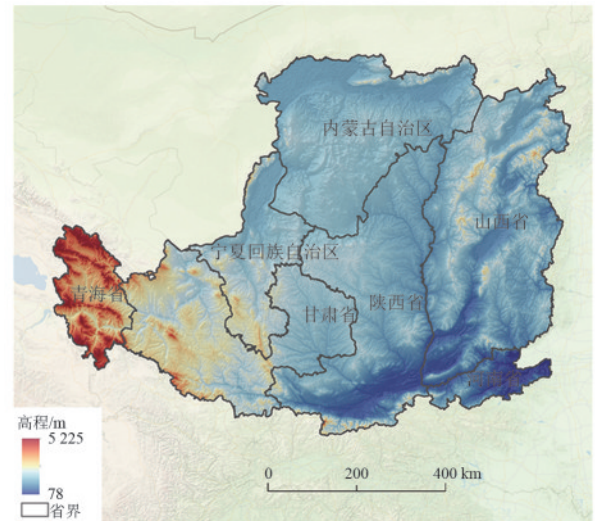


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of study area

1.2 数据源与预处理

本研究涉及的数据包括 NPP 计算数据、碳水通量数据及驱动因子数据等,详细信息见表 1,对气候数据采用克里金插值法进行空间降尺度处理,所有数据均基于 ArcGIS 10.8 软件平台批量进行掩膜、投影转换(统一投影为 WGS_1984_UTM_Zone_50N 坐标系)并重采样至 1 km,消除尺度差异对模型计算的干扰。

式中: x 为空间位置; t 为月份; $NPP(x, t)$ 为像元 x 处的植被在 t 月份内的净初级生产力[g/m^2 , (以 C 计)]; $SOL(x, t)$ 为 t 月在像元 x 处的太阳总辐射量, $MJ/(m^2 \cdot month)$; $FPAR(x, t)$ 为植被层对入射光合有效辐射的吸收比例;常数 0.5 为植被所能利用的太阳有效辐射占太阳总辐射的比例,波长为 0.38~0.71 μm ;

$\epsilon(x, t)$ 为像元 x 在 t 月的实际光能利用率 [g/MJ, (以 C 计)], 计算公式^[18]为:

$$\epsilon(x, t) = T_{\epsilon 1}(x, t) \times T_{\epsilon 2}(x, t) \times W_{\epsilon}(x, t) \times \epsilon_{\max} \quad (2)$$

式中: $T_{\epsilon 1}$ 和 $T_{\epsilon 2}$ 分别为低温和高温对植被光能利用率的胁迫影响系数; W_{ϵ} 为水分对植被光能利用率的胁迫系数, 反映水分条件影响; ϵ_{\max} 为理想条件下植被的最大光能利用率, 即植被在没有任何限制性条件下对光合有效辐射的利用率, 本研究中采取朱文泉等^[19]测定的中国典型植被类型的最大光能利用率值。

1.3.1 FPAR 参数的改进 FPAR 主要根据各类型植被 NDVI 的最大值和最小值及 FPAR 最大值和最小值计算, 公式为:

$$FPAR(x, t) = \alpha FPAR_{NDVI} + (1 - \alpha) FPAR_{SR} \quad (3)$$

$$FPAR(x, t)_{NDVI} = \frac{NDVI(x, t) - NDVI_{i, \min}}{NDVI_{i, \max} - NDVI_{i, \min}} \times (FPAR_{\max} - FPAR_{\min}) + FPAR_{\min} \quad (4)$$

$$FPAR(x, t)_{SR} = \frac{SR(x, t) - SR_{i, \min}}{SR_{i, \max} - SR_{i, \min}} \times (FPAR_{\max} - FPAR_{\min}) + FPAR_{\min} \quad (5)$$

$$SR(x, t) = \frac{1 + NDVI(x, t)}{1 - NDVI(x, t)} \quad (6)$$

式中: $NDVI(x, t)$ 、 $SR(x, t)$ 为像元 x 在 t 月的归一化植被指数与简单比值植被指数; $FPAR(x, t)_{NDVI}$ 、 $FPAR(x, t)_{SR}$ 是通过 NDVI 与 SR 计算出像元 x 在 t 月的植被层对光合有效辐射吸收比例, $FPAR_{\max} = 0.95$ 与 $FPAR_{\min} = 0.001$ 为固定参数值, $NDVI_{i, \max}$ 和 $NDVI_{i, \min}$ 分别对应第 i 种植被类型的 NDVI 最大值和最小值, $SR_{i, \max}$ 和 $SR_{i, \min}$ 分别为第 i 种植被类型 NDVI 的 95% 和 5% 百分位数。

NDVI 与绿色生物量存在非线性饱和关系, 在植被高覆盖度区域, NDVI 较易饱和导致表征准确度下降, 因此, 本研究引入 $kNDVI$ 代替 NDVI, 以减弱非线性影响并提升估算效果, 计算公式为:

$$kNDVI = \tan h \left[\left(\frac{NIR - Red}{2\sigma} \right)^2 \right] \quad (7)$$

式中: NIR 为近红外波段的反射值; Red 为红波段的反射值; σ 为控制近红外波段和红外波段之间的距离参数。

1.3.2 水分胁迫系数的改进 短波红外波段对植被质量分数的变化较为敏感^[20], 近红外波段受叶片内部结构和干物质含量影响, 具有较强的穿透叶冠能力^[21], 遥感研究中通常采用 SWIR 与 NIR 波段结合的方式估算植被质量分数^[22]。本研究引入 LSWI 计

算水分胁迫系数以改进 CASA 模型, 计算公式为:

$$W = \frac{1 + LSWI}{1 + LSWI_{\max}} \quad (8)$$

$$LSWI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{swir}}{\rho_{nir} + \rho_{swir}} \quad (9)$$

式中: W 为水分胁迫系数, 取值为 $0 \sim 1$; ρ_{nir} 和 ρ_{swir} 分别为近红外波段和短波红外波段的反射率; LSWI 为地表水分指数, 是 ρ_{nir} 和 ρ_{swir} 的归一化指数, 取值为 $-1 \sim 1$, 数值越低则表明水分胁迫程度越高; $LSWI_{\max}$ 为单个像元内植被生长季最大的地表水分指数, 使用最大值合成法估算。

1.3.3 精度评定 本研究采用均方根误差 (RMSE)、决定系数 (R^2) 与皮尔逊相关系数 (r) 三重指标体系, 系统评估改进 CASA 模型相较于原始模型模拟 NPP 的精度。其中, RMSE 量化模型预测值与实测数据的拟合偏差, 值越小表征误差控制越优; R^2 揭示模型对 NPP 的解释能力, 值越趋近 1, 说明机理耦合越完备; r 表征模拟结果与观测数据的相关性, 绝对值越大指示相关性越显著^[10]。

MOD17A3 产品常用于区域及全球尺度 NPP 研究^[23], 学者多通过与模型模拟结果对比验证 NPP 估算模型精度。本研究沿用此思路, 将原始及改进 CASA 模型模拟的 NPP 数据与 MODIS NPP 产品对比, 不同年份模拟结果见表 2。

表 2 与 MOD17A3 NPP 数据集对比结果

Table 2 Comparison results with MOD17A3 NPP dataset

年份	CASA 模型			改进 CASA 模型		
	RMSE	R^2	r	RMSE	R^2	r
2002	0.66	0.56	0.78	0.56	0.59	0.86
2012	0.62	0.53	0.81	0.48	0.57	0.85
2022	0.58	0.55	0.76	0.52	0.63	0.84

由表 2 可知, 2 组模型与 MODIS NPP 的决定系数 (R^2) 和相关系数 (r) 均较为稳定, 但改进后的 CASA 模型值更大, 表明相关性更好, 同时均方根误差 RMSE 更小。表明改进后的模型估算 NPP 数据可靠, 且与 MODIS NPP 保持较高的一致性, 验证改进模型的合理性与准确性。

1.4 CUE、WUE 和 COM 的计算方法

碳利用效率 (CUE) 与水利用效率 (WUE) 的计算公式为:

$$CUE = \frac{NPP}{GPP} \quad (10)$$

$$WUE = \frac{NPP}{ET} \quad (11)$$

式中: NPP 为植被净初级生产力; GPP 为植被总初级生产力, g/m^2 (以 C 计); ET 为植被蒸散发, mm。

CUE值无量纲,WUE单位为 $g/(m^2 \cdot mm)$ (以C计)。

碳水复合利用效率(COM)通过几何平均的方法综合碳利用效率(CUE)和水利用效率(WUE)。该方法有效减少因单一极值导致的偏差,更加全面反映植被在不同环境条件下的资源利用效率,同时克服单一指标所固有的局限性^[5]。计算公式为:

$$COM = \sqrt{CUE \times WUE} \quad (12)$$

1.5 趋势分析

Theil-Sen Median是一种稳健且高效的非参数趋势估计方法;Mann-Kendall检验无需数据正态分布假设、对缺失值与异常值不敏感,适用于非线性趋势的识别^[24]。

$$\beta = \text{median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), \forall j > i \quad (13)$$

式中: x_i 和 x_j 为时间序列数据。 $\beta > 0$ 表示生态环境质量呈上升趋势; $\beta < 0$ 表示生态环境质量呈下降趋势。

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_j - x_i) \quad (15)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (16)$$

式中: Z 为标准化统计量; $\text{Var}(S)$ 为方差; n 为序列中的数据个数。

为更好地研究碳水利用效率变化趋势,参照前人^[25]研究根据 β 值结合MK检验统计量 $|Z|$ 将变化趋势分为9个等级:极显著退化、显著退化、微显著退化、不显著退化、无明显变化、不显著改善、微显著改善、显著改善和极显著改善。

1.6 最优参数地理探测器

最优参数地理探测器(OPGD)通过优化空间数据离散化方法、空间层间断裂数和空间尺度参数提升模型准确性。离散过程采用自然断点法(B)、相等区间(EI)和分位数(QU)等方法^[26],断点设为5~10个;选择观测尺度时,以不同尺度下解释力 q 值90%分位数为依据,取该分位数达最大值时对应的 q 值所匹配的空间尺度。

本研究将COM和各因子栅格数据均重采样为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 、 $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ 、 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ 、 $7 \text{ km} \times 7 \text{ km}$ 、 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$,通过对比各空间尺度 q 值90%的分位数,选取 q 最大的 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ 作为空间尺度进行研究。

1.6.1 因子探测 主要用于识别造成空间分异性的驱动因子,公式为:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (17)$$

式中: q 为影响因素对碳水复合利用效率的解释力, q 值越大,解释力越强; L 为变量因子的分级或分类数; N_h 和 N 为不同分级区域和全区域的样本数; σ_h^2 和 σ^2 为不同分级的区域和全区域内COM的方差。

1.6.2 交互作用探测 交互探测器能够识别不同风险因子间的交互作用,本研究依据 q 关系将交互作用划分为5类^[27],若交互项解释力低于单因子最小值,则为非线性减弱;介于单因子解释力间时为单因子非线性减弱;高于单因子最大值时为双因子增强;等于二者之和时为独立;若超过二者之和,则为非线性增强。

1.6.3 风险探测 风险探测器能够确定因变量驱动因子的适宜范围和类型,并判断不同子域属性平均值是否存在显著差异。计算公式为:

$$t_{\bar{Y}_{h=1} - \bar{Y}_{h=2}} = \frac{\bar{Y}_{h=1} - \bar{Y}_{h=2}}{\sqrt{\left[\frac{\text{Var}(\bar{Y}_{h=1})}{n_{h=1}} + \frac{\text{Var}(\bar{Y}_{h=2})}{n_{h=2}} \right]}} \quad (18)$$

式中: \bar{Y}_h 为子区域 h 内的属性平均值; n_h 为子区域 h 内样本数量; Var 为方差。

1.7 偏最小二乘结构方程模型

PLS-SEM作为一种多变量统计模型,由测量模型和结构模型组成,适用于非正态数据和形式与反映测量模型^[28],可有效研究各潜在变量对黄土高原碳水复合利用效率的直接和间接影响。模型计算公式为:

$$\hat{\xi}_j = \sum_{i=1}^I \beta_{ij} \xi_i + \zeta_j \quad (19)$$

式中: ξ_i 为第 i 个外生潜在变量; ξ_j 为第 j 个内生潜在变量; β_{ij} 为第 i 个外生潜在变量与第 j 个内生潜在变量间的路径系数; ζ_j 为误差项。

$$x_{jk} = \lambda_{jk} \xi_j + \zeta_j \quad (20)$$

式中: x_{jk} 为观测变量; ξ_j 为潜在变量; λ_{jk} 为第 k 个主分量的第 j 个观测变量的因子荷载; ζ_j 为观测误差项。

黄土高原生态系统碳水复合利用效率的时空分异受地形、气候与人类活动协同调控。地形上,DEM、坡度通过影响微气候和土壤侵蚀,间接调控植被碳汇与水分响应;坡向因太阳辐射差异,造成阴阳坡光合与蒸散的空间异质性。气候方面,降水年内不均与年际波动限制植被生长,地表温度LST与水汽压差VPD协同影响光合作用与水分利用,土壤状况直接决定植被可利用水量。人类活动中,GDP与夜间灯光数据NTL反映区域发展强度,影响碳水循环;人口密度加剧水资源竞争,抑制植被

水分利用效率。

本研究将气候、地形、人类活动相关因子分别整合为 climate、terrain 和 human activity 潜在变量,基于黄土高原区域特征^[29]构建概念模型并提出假设:1)地形、气候和人类活动直接影响 COM 空间分异;2)地形通过气候和人类活动间接影响 COM;3)气候通过人类活动间接影响 COM。

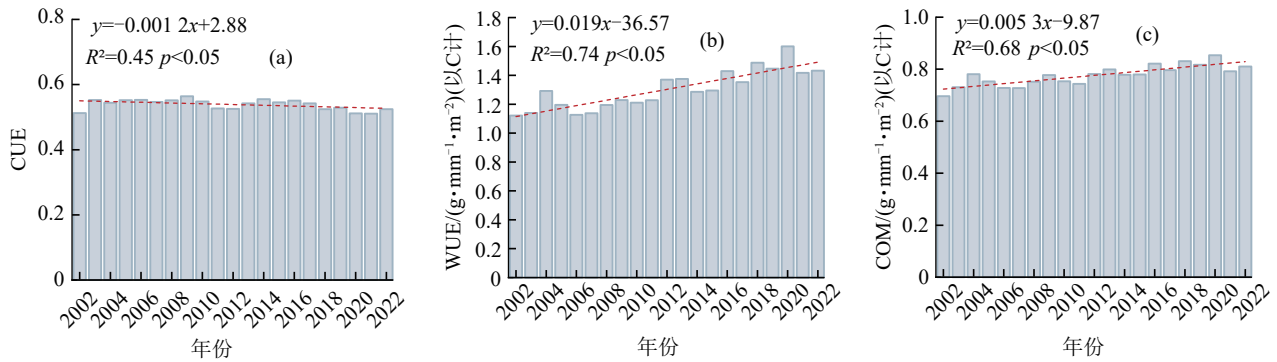


图 2 黄土高原 2002—2022 年 CUE、WUE、COM 线性变化趋势

Fig.2 Linear variation trends of CUE, WUE, and COM on Loess Plateau from 2002 to 2022

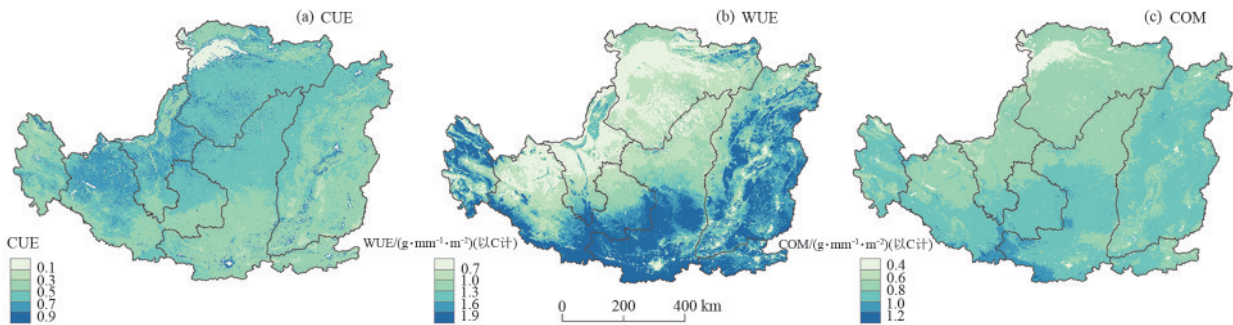


图 3 黄土高原 2002—2022 年 CUE、WUE、COM 空间分布

Fig.3 Spatial distribution of CUE, WUE, and COM on Loess Plateau from 2002 to 2022

黄土高原 CUE 呈“西北高、东南低”的空间分布格局。北部地区,如甘肃北部、陕北高原等区域 CUE 值相对较高,多集中在 0.6 以上;而南部区域因水热条件波动剧烈,植物呼吸消耗较高,CUE 偏低。2002—2022 年,CUE 整体呈微弱下降趋势,表明单位 GPP 用于 NPP 的比例在减少,尤其在 2014 年后,CUE 整体趋于下降。

WUE 总体上表现为“东南高,西北低”的空间格局。南部区域,如秦岭山地及黄土丘陵区,WUE 多集中在 1.5 g/(m²·mm)(以 C 计)以上;而北部干旱区由于水分限制严重,WUE 普遍较低。WUE 在 2002—2022 年表现为持续上升趋势,从 1.12 上升至约 1.43。2005 年和 2006 年 WUE 较低,主要是因为降水量显著偏低,尤其是春夏季干旱频发,限制植被生长并降低其对水分的利用效率。

COM 作为碳与水分利用能力的综合体现,其空间分布特征受 CUE 与 WUE 的共同影响,其空间分布总体较为均衡,但南部仍略高于北部。秦巴山区、陕南丘陵等区域表现出较高的 COM [>1.0 g/(m²·mm)

2 结果与分析

2.1 CUE、WUE 和 COM 的时空变化特征

图 2、图 3 分别为黄土高原地区 CUE、WUE 与 COM 的时间变化趋势与空间分布。整体上看,三者 在空间上均表现出显著的区域差异性,该差异性主要受到气候变化、水分条件、地形地貌及人为活动等 多重因素的共同影响。

(以 C 计)];而北部干旱区的 COM 普遍在 0.8 以下,生态系统资源利用的综合效益偏低。2002—2022 年 COM 整体呈上升趋势,从 0.70 升至 0.80,表明尽管 CUE 略有下降,但 WUE 的显著提升在很大程度上弥补了碳固定效率下降所带来的负面效应。

2.2 CUE、WUE 和 COM 的变化趋势

基于 Theil-Sen 趋势估计与 Mann-Kendall 显著性检验方法对 2002—2022 年黄土高原地区生态系统 CUE、WUE 及 COM 进行空间趋势分析(图 4)表明,三者均呈明显的空间异质性特征。图 5 为 2002—2022 年黄土高原 CUE、WUE 及 COM 变化速率空间分布。

黄土高原 CUE 呈“东南改善、西北退化”的空间异质性格局。由图 4 可知,黄土高原中东部与南部的部分地区为改善区域,占研究区面积的 30.30%;且该地区 CUE 年增长速率普遍 >0 ,表明植被碳利用效率提升;退化区域占比 55.74%,甘肃西南地区呈现出极显著退化态势,年下降速率普遍低于 $-0.01/a$,局部甚至超过 $-0.015/a$,可能受气候干旱加剧、土壤退化

及城市扩张等人为活动影响,导致CUE退化。

WUE整体表现为改善趋势,改善区域占总面积的87.41%,其中极显著改善区域占比56.2%,主要集中在黄土高原中部地区,包括陕西北部、山西西部及甘肃东部等区域;WUE在该区域年增长速率普遍超过 $0.05 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$ (以C计),部分地区甚至达到0.1

以上,表明单位水分利用效率显著增强,植被对水分资源的适应性增强;宁夏北部、甘肃西北部、青海东部等地则表现出轻微退化,WUE下降速率多在 $-0.025 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$ (以C计)以下,与降水减少或蒸散增强、水资源竞争加剧、灌溉效率低下及人类活动强度加大等有关。

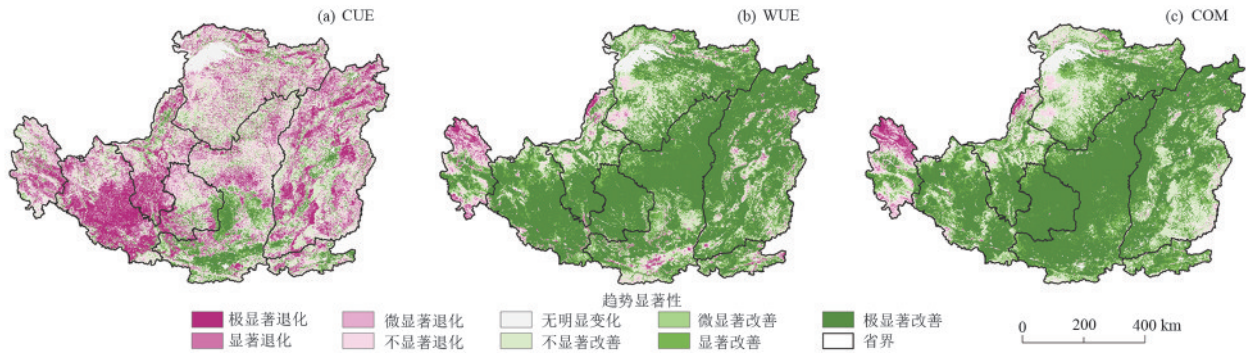


图4 2002—2022年黄土高原CUE、WUE及COM变化趋势

Fig.4 Variation trends of CUE, WUE, and COM on Loess Plateau from 2002 to 2022

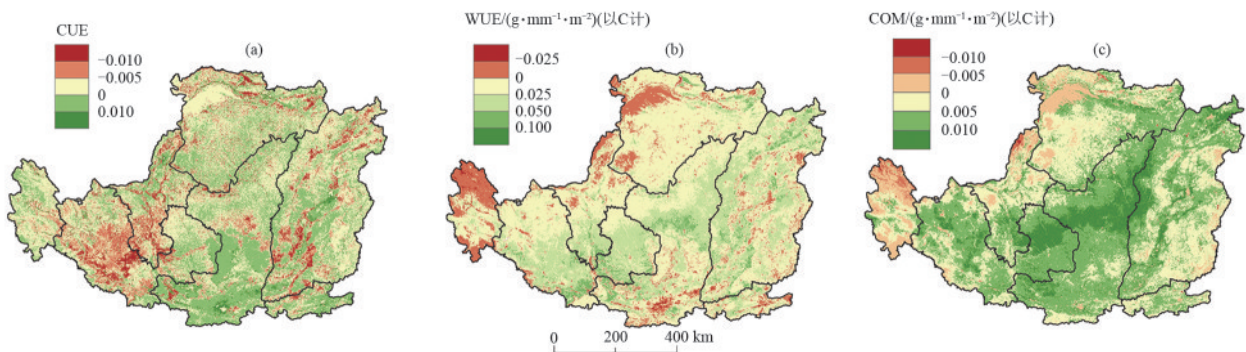


图5 2002—2022年黄土高原CUE、WUE及COM变化速率空间分布

Fig.5 Spatial distribution of variation rates of CUE, WUE, and COM on Loess Plateau from 2002 to 2022

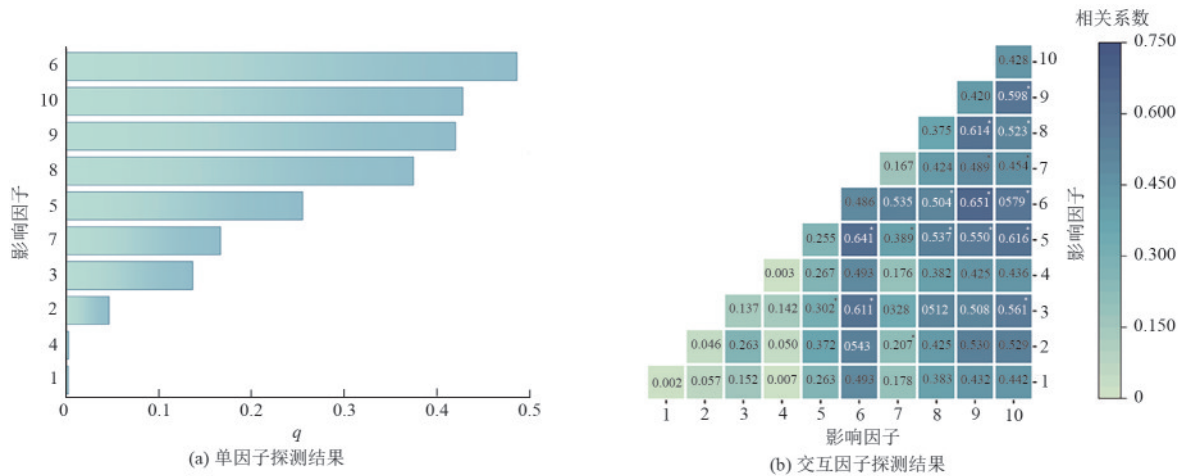
COM指标则展示出明显的“整体提升”趋势,改善区域占区域面积的87.8%,广泛分布于整个黄土高原,尤其在陕西中北部、山西南部及甘肃东部等地表现出高度一致的正向变化,且大部分区域年增长速率集中在 $0.005 \sim 0.01 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$ (以C计),局部地区甚至超过0.01。但青海东部与黄土高原边缘地带局部仍存在COM下降趋势,其年退化速率虽相对较低(< -0.005),可能受到多重因素叠加影响,如气候异常、土地退化等。

2.3 COM影响因素分析

2.3.1 最优参数地理探测器 研究区COM年平均值的单因子探测结果见图6a,各因子均通过显著性检验($p < 0.001$)。单因子探测结果表明,降水量Pre对黄土高原COM影响最显著, q 为0.486;VPD与LST次之, q 分别为0.428和0.420;土壤湿度(Soil)、人口密度(Pop)、坡度(Slope)和GDP有一定作用, q 分别为0.375、0.255、0.167和0.137;其他因素影响较弱, q 均 < 0.1 。

交互因子探测结果见图6b。各变量的交互作

用均表现为非线性增强和双因子增强,未出现减弱或独立情况,表明各因子共同作用于COM的空间分异效果比因子单独作用时更强。地表温度与降水量间的交互作用最为显著(0.651),其次为人口密度与降水量(0.641),人口密度与水汽压差(0.616)。3组交互因子均为双因子增强,表明在黄土高原地区,降水在调控碳水复合利用效率方面具有核心驱动作用,并在不同情境下与温度和人口密度产生协同效应;适宜的温度配合充沛降水,可加速植物光合与蒸腾速率,优化碳水代谢提升COM;而人口密度高的区域土地利用活动相对密集,充足降水可为植被恢复工程提供基础,有效支持植被生长,促进COM增强;人口密度与水汽压差的交互作用表明,在水汽压差高、大气干燥的区域,合理的人口干预可有效缓解蒸散对植被水分平衡的负面影响,维持碳水过程稳定。揭示黄土高原区域各因子间的相互作用模式,其他驱动因子的交互作用强弱不一,对于碳水复合利用效率的影响呈现出差异化特征。



注:1~10分别为坡向(Aspect)、DEM、国内生产总值(GDP)、夜间灯光(NTL)、人口密度(Pop)、Pre(降水量)、坡度(Slope)、土壤湿度(Soil)、地表温度(LST)、水汽压差(VPD);*表示交互类型为双因子增强。

图 6 因子探测结果

Fig.6 Factor detection results

图 7 的风险探测结果表明,在地形因素中 DEM 在 2 960~3 580 m、坡度 > 5.63° 和坡向在 179°~225° 时,碳水利用效率较好,COM 平均值最高可达 0.85。高海拔区域气温相对较低,蒸发速率较小,有利于土壤水分保留,同时高原地带太阳辐射较强,充足的光照能增强光合作用能力;坡度较大有助于表层径流的流通,避免积水造成植物根系缺氧,而南向偏西的坡面则因接收日照时间更长,光能利用效率较高,进一步促进 GPP 积

累并缓解水分胁迫。在该地形条件下,水热资源的匹配性更优,能提升碳水复合利用效率;人类因素中人口密度为 83.7~159 人/km²、GDP 为 72.4~220 万元/km² 和夜间灯光为 0.252~0.901 nW/(cm²·sr) 时,COM 平均值最高可达 0.82,表明中等强度的人类活动有助于提升碳水复合利用效率,此类区域通常基础设施较完善,生态工程与农业管理水平相对较高,利于植被生长和资源高效利用。

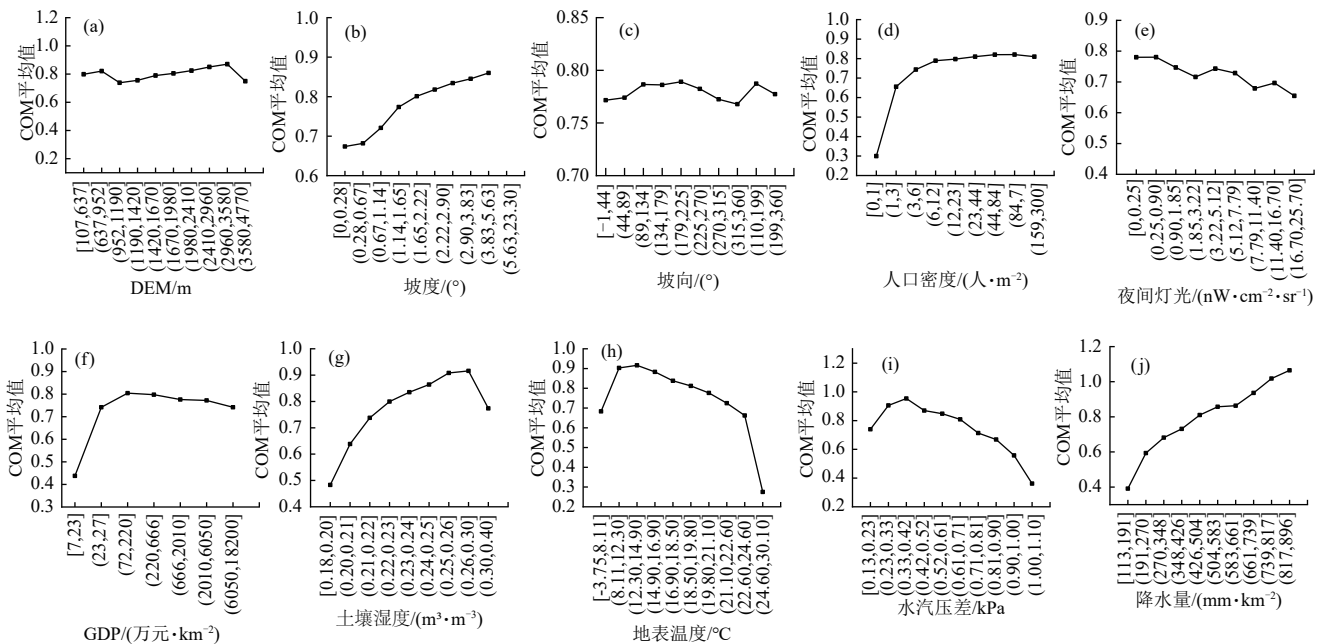


图 7 各驱动因子与碳水复合利用效率间的关系

Fig.7 Relationships between each driving factor and COM

适度的人口与经济密度为生态恢复提供良好的人力与财政支持,能够推动区域碳与水资源的协调利用;气候因素中,降水量达到 817~896 mm/km²、土壤湿度为 0.264~0.294 m³/m³、地表温度为 12.3~14.9 °C 和 VPD 为 0.325~0.421 kPa 时,碳水利用效率

达到较高水平,COM 平均值可达 1.0,表明此类气候条件为植被生长提供最为适宜的水热与土壤环境,降水充足保障土壤水分的持续供给,维持在适宜的湿度水平,有利于植物根系吸收并维持高水平的蒸腾与光合作用;较低但稳定的气温抑制蒸发

量,能够延长土壤水分的保留时间;适中的水汽压差既能促进植物水分输导和气孔打开,又不因蒸散过强造成水分亏缺,从而有助于碳固定和水分调控过程的协调进行。

2.3.2 偏最小二乘结构方程 偏最小二乘结构方程结果(图 8)表明,所有驱动因子的集体作用解释黄土高原 COM 空间分异模式的 65.2%, $GOF=0.507$,表明模型拟合效果良好^[30],证明 PLS-SEM 能够高效精准地解释研究区 COM 空间分异的影响。表 3 和图 8 为 PLS-SEM 结果,模型中的路径系数定量解释各潜在变量的直接影响和间接影响,地形、气候、人类活动对黄土高原 COM 的空间分异产生显著影响。气候和人类活动对 COM 产生直接的积极影响,其中气候的影响最为显著($\beta=0.800$),其次是人类活动($\beta=0.014$),地形产生直接的抑制作用($\beta=-0.195$)。具体而言,地形对气候、人类活动都产生显著的直接影

响,其中对气候($\beta=0.578$)造成促进作用,对人类活动($\beta=-0.210$)造成抑制作用,间接促进 COM($\beta=0.459$);气候因素对人类活动起促进作用($\beta=0.094$),但对 COM 造成间接的抑制影响可忽略不计, β 仅为 0.005。综上所述,黄土高原地区气候因素对 COM 的促进作用最强($\beta=0.805$),其次为地形因子($\beta=0.264$)。表明黄土高原生态系统效率主要受气候驱动,该特征与典型半干旱高原生态系统对气候变化的敏感性基本一致。

表 3 潜在变量对黄土高原 COM 的影响
Table 3 Effects of potential variables on COM on Loess Plateau

潜在变量	直接影响	间接影响	总影响
地形因子	-0.195	0.459	0.264
气候因子	0.800	0.005	0.805
人类活动因子	0.014	—	0.014

注:—表示无影响。

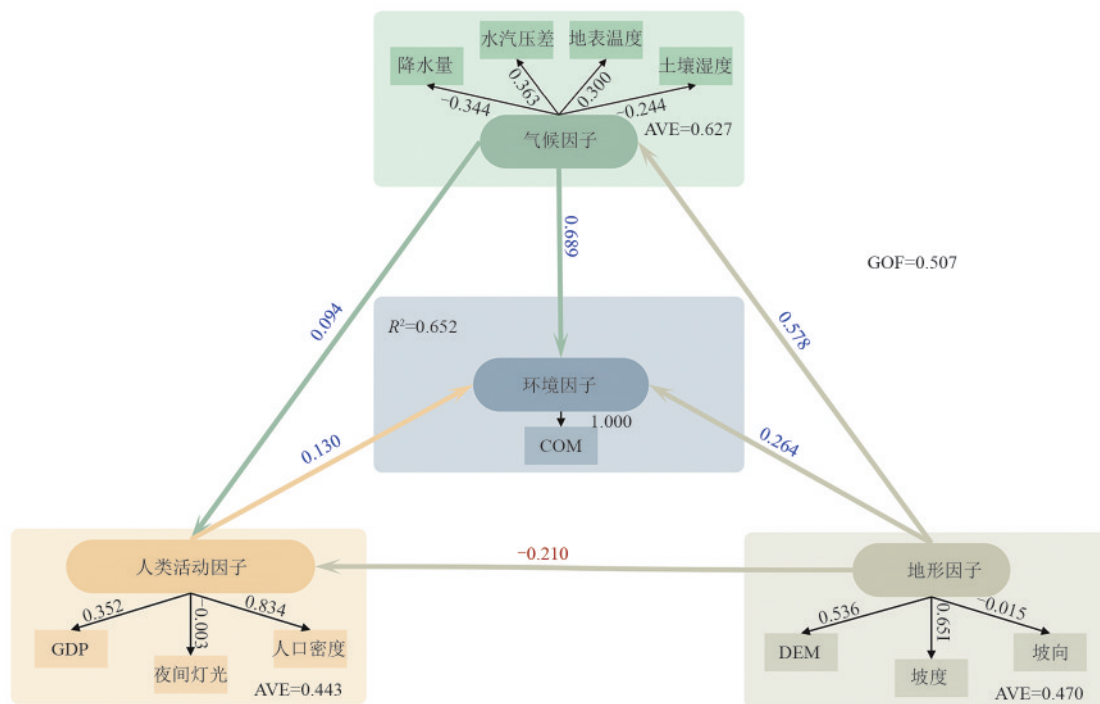


图 8 各潜在变量与碳水复合利用效率之间的因果关系
Fig.8 Causal relationships between each potential variable and COM

3 讨论

3.1 碳水复合利用效率的时空演变特征

研究时限内,黄土高原植被 CUE 呈微弱下降态势,而 WUE 呈波动上升状态,与前人^[31-32]研究基本一致。该趋势分化主要受气候变化与植被生理的共同影响。气温升高导致呼吸消耗加大,更多的光合产物被用于代谢维持而非净增长,导致单位 GPP 向 NPP 转化的效率降低,CUE 随之下落。而 WUE 的上升则体现植被在水分胁迫条件下的适应性调整,即通过调节气孔开放与水分利用策略,在保持光合

作用的同时降低蒸散损耗,从而提高单位水分消耗下的碳固定能力^[33]。

2002—2022 年 COM 呈整体上升趋势,此趋势表明,在碳利用效率略有退化的背景下,水利用效率的持续增强在很大程度上弥补生态系统功能的下降风险,反映出植被系统对气候胁迫的协同适应能力提升。由于水分是半干旱区生态系统的核心限制因子,WUE 的改善成为推动 COM 整体改善的主导力量,与 YANG 等^[6]研究结果一致。在此过程中,植被通过调节气孔开放、优化叶片结构和叶绿素等生理

与形态特征,提高在干旱胁迫下的适应性,使其能够在有限水分条件下保持较高的碳固定效率。同时,生态工程促进以草本和灌木为主的群落恢复,群落不仅具备更高的水分利用能力和抗逆性,还通过提高地表覆盖度和改善土壤水分保持条件,进一步巩固并推动黄土高原COM的整体改善。

3.2 碳水复合利用效率驱动机制

最优参数地理探测器的单因子探测结果表明,降水量和水汽压差是驱动COM空间分异的主要因子,其次为地表温度和土壤湿度。作为典型的半干旱区,水分是黄土高原生态系统碳水利用效率的核心限制因子,降水量变化直接影响植被生长周期,而水汽压差较高加剧蒸散消耗,使植被面临更高的水分亏缺风险,从而对COM形成双重压力。地表温度通过调节光合与呼吸过程间接作用于COM,而土壤水分条件则在短期内缓解干旱胁迫,提升碳水资源的利用效率。交互探测进一步揭示,自然因子间的协同作用最为突出,其中地表温度与降水量对COM的解释力最强,反映出热量与水分匹配是半干旱区植被维持功能的关键。同时,人口密度与降水量、人口密度与水汽压差的强交互效应表明,人类活动虽然直接作用有限,但通过水资源利用放大气候约束的影响,在人口密集区尤为明显。

PLS-SEM的结果显示,2002—2022年黄土高原地区COM变化主要受气候因素驱动,其中气候因素显示出显著的正向影响($\beta=0.800$)。黄土高原整体处于干旱半干旱气候区,气候波动频繁,尤其在生长期(5—9月)降水集中,有助于在关键生长期缓解水分胁迫,提升植被的光合作用与水分利用效率;同时,气温阶段性升高延长植被生长周期,植被对资源的获取与转化能力增强,进一步促进碳固定与水分的协同利用效率,提高COM水平。相比之下,地形因素对COM表现出一定的抑制作用($\beta=-0.195$),但其影响机制较为复杂。一方面,地形通过正向作用于气候($\beta=0.578$),影响区域水热格局,间接加强气候对COM的促进作用;另一方面,地形对人类活动具有空间限制效应($\beta=-0.210$),如限制城市扩张和农业开发,在一定程度上降低人为干扰强度,有助于生态系统保持较高的自然调节能力,从而间接促进COM的提升。综上,气候因素是主导COM变化的核心驱动力,地形因素则通过对气候与人类活动的双重调节,间接影响COM过程,体现出其在生态系统碳水耦合调控中的间接性和多路径性。

OPGD与PLS-SEM分析分别从空间解释力和因果路径两方面揭示COM的驱动机制,二者在结果上具有一定一致性,也表现出差异性。气候因子

在2类模型中均占据主导地位,体现气候对碳水过程的决定性作用;但人类活动在PLS-SEM中仅呈微弱的直接效应,而在OPGD中通过与降水和水汽压差的交互作用显著放大其影响力。地形在2种方法中均表现为协同调控:PLS-SEM强调其通过气候与人类活动的间接影响发挥作用,OPGD则体现为与其他因子的交互增强。由此可见,COM的变化机制不仅包含气候主导下的线性因果关系,也包含人类活动与地形共同参与的非线性交互效应,2种方法结合为驱动机制的全面认识提供互补视角。

3.3 生态修复启示

黄土高原COM的整体改善并非单纯依赖自然恢复过程,而是与长期生态治理和重大工程的持续推进密切相关。1998年启动的天然林资源保护工程有效遏制过度砍伐,稳定区域碳汇功能。1999年实施的退耕还林(草)工程规模空前,大量坡耕地被转化为林草植被,逐步降低农牧活动对有限水资源的竞争,其效应在2000年代初开始显现,表现为水分利用效率的持续提升,并成为COM改善的重要驱动力。进入21世纪后,小流域综合治理和矿山地质环境恢复等举措进一步改善局地水分条件与生态环境。2016年以来,开展的山水林田湖草沙生态保护修复工程则强化多要素系统治理,提升生态系统稳定性和资源利用效率,进一步巩固近年来COM的改善趋势^[34]。总体来看,生态修复工程在不同阶段的衔接与累积效应,共同推动黄土高原COM的持续改善。从生态恢复的角度来看,应充分考虑水热资源的空间分异特征,因地制宜地开展生态工程建设,提升关键区域的水分保持能力和植被适应性。同时,利用地形对人类活动的限制效应,在生态脆弱区划定生态保护红线,限制高强度开发,强化自然过程主导下的生态恢复路径。可通过优化种植结构、推广节水型植被、增强区域气候调节能力等手段,提高生态系统对气候波动的适应力,进一步增强碳水资源的协同利用效率,实现生态恢复与资源可持续利用的双重目标。另外,在政策层面,应继续推动生态补偿、退耕还林、绿色发展项目落地实施,并加强区域协同治理能力建设,以应对复杂的地形和多变的气候,推动黄土高原生态系统向高效、稳定、可持续方向发展。

4 结论

1)基于改进FPAR指数和水分胁迫系数的改进CASA模型,较原模型估算NPP精度提升($R^2=0.63$),估算效果较好。

2)黄土高原2002—2022年碳水复合利用效率稳中向好,趋势分析结果表明,COM呈“整体提升”趋势,改善区域占研究区面积87.8%,5.79%的区域无

明显变化,6.41%的区域呈退化趋势。

3)降水量、水汽压差、地表温度和土壤湿度对COM解释力较强,且地表温度与降水量、人口密度与降水量和人口密度与水汽压差的交互作用显著;在DEM为2 960~3 580 m、坡度 $>5.63^\circ$ 和坡向在 $179^\circ\sim 225^\circ$ 的地形条件下,降水量为817~896 mm/km²、土壤湿度为0.264~0.294 m³/m³、地表温度为12.3~14.9 °C和水汽压差为0.325~0.421 kPa的气候环境中,以及人口密度83.7~159人/km²、夜间灯光0.252~0.901 nW/(cm²·sr)和GDP为72.4~220万元/km²的人类活动影响范围内,COM相对较高。

4)气候因子对黄土高原COM正向影响显著(0.805),其中以直接影响为主;地形因子影响次之,直接影响被间接影响抵消;人类活动的直接影响相对较弱,几乎完全由直接影响造成。

参考文献:

- [1] HE Y, PIAO S L, LI X Y, et al. Global patterns of vegetation carbon use efficiency and their climate drivers deduced from MODIS satellite data and process-based models[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 256:150-158.
- [2] 底阳平,曾辉,张扬建,等.多尺度碳利用效率研究进展[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(6):1849-1860.
- DI Y P, ZENG H, ZHANG Y J, et al. Research advances in carbon use efficiency at multiple scales[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(6):1849-1860.
- [3] 张莘,陈燕飞,丁佳伟,等.长江流域生态系统水分利用效率时空演变特征及驱动分析[J]. *人民珠江*, 2025, 46(3):82-92.
- ZHANG P, CHEN Y F, DING J W, et al. Spatio-temporal evolution characteristics and driving analysis of ecosystem water use efficiency in Yangtze River basin[J]. *Pearl River*, 2025, 46(3):82-92.
- [4] 杨梅焕,王添晴,李扬,等.黄土高原植被水分利用效率时空变化及其对不同影响因子的响应强度[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(3):159-169.
- YANG M H, WANG T Q, LI Y, et al. Spatiotemporal variation of vegetation water use efficiency on the Loess Plateau and its response intensity to different influencing factors[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(3):159-169.
- [5] WANG Y X, PENG L, CHEN T T, et al. Driving forces and ecological restoration revelation in southwest China based on the divergence characteristics of ecosystem compound use efficiency[J]. *Forests*, 2024, 15(4):e641.
- [6] YANG Y, NIE X W, CONG Z Y, et al. Assessing the carbon-water compound use efficiency in fragile karst region: The Yunnan-Guizhou Plateau, China[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 166:e112320.
- [7] CAMPS-VALLS G, CAMPOS-TABERNER M, MORENO-MARTÍNEZ Á, et al. A unified vegetation index for quantifying the terrestrial biosphere[J]. *Science Advances*, 2021, 7(9):eabc7447.
- [8] FU Z, CIAIS P, WIGNERON J P, et al. Global critical soil moisture thresholds of plant water stress[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1):e4826.
- [9] HUANG X, HE L, HE Z W, et al. An improved Carnegie-Ames-Stanford Approach model for estimating ecological carbon sequestration in mountain vegetation[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022, 10:e1048607.
- [10] 鲁铁定,章园,曾思婷,等.江西省NPP估算及其与气候因子的关联分析-基于改进CASA模型[J]. *中国环境科学*, 2025, 45(1):369-378.
- LU T D, ZHANG Y, ZENG S T, et al. Estimation of net primary productivity and correlation study with climate parameters in Jiangxi Province using the enhanced CASA model[J]. *China Environmental Science*, 2025, 45(1):369-378.
- [11] 奎国娟,史常青,杨建英,等.内蒙古草原区植被覆盖度时空演变及其驱动力[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(10):2713-2722.
- KUI G X, SHI C Q, YANG J Y, et al. Spatial-temporal variations of vegetation coverage and its driving force in Inner Mongolia grassland, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(10):2713-2722.
- [12] WANG Q, MORENO-MARTÍNEZ Á, MUÑOZ-MARÍ J, et al. Estimation of vegetation traits with kernel NDVI[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2023, 195:408-417.
- [13] 李婧,韩海荣,康峰峰,等.基于改进CASA模型的晋北地区植被NPP时空动态及气候影响研究[J]. *北京林业大学学报*, 2023, 45(7):47-60.
- LI J, HAN H R, KANG F F, et al. Spatiotemporal dynamics and climate impact of vegetation NPP in the northern Shanxi Province region based on the improved CASA model[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2023, 45(7):47-60.
- [14] CEN Q Y, ZHOU X C, QIU H F. Exploration of urban neighborhood blue-green space quality patterns and influencing factors in waterfront cities based on MGWR and OPGD models[J]. *Urban Climate*, 2024, 55:e101942.
- [15] SHI J, ZHANG P, LIU Y, et al. Study on spatiotemporal changes of wetlands based on PLS-SEM and PLUS model: The case of the Sanjiang Plain[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 169:e112812.
- [16] 张怡,王志慧,卢小平,等.黄土高原生态系统碳汇时空变化及其影响因素[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(1):266-274.
- ZHANG Y, WANG Z H, LU X P, et al. Evolution of

- ecosystem carbon sink and its driving factors in the Loess Plateau [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(1):266-274.
- [17] NA M, LIU X, TONG Z J, et al. Analysis of water quality influencing factors under multi-source data fusion based on PLS-SEM model: An example of East-Liao River in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 907: e168126.
- [18] 赵雪瑞, 韩玲, 刘明, 等. 基于改进CASA模型的陕西省植被NPP遥感估算[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(3):247-256.
- ZHAO X R, HAN L, LIU M, et al. Remote sensing estimation of vegetation NPP in Shaanxi Province based on improved CASA model [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(3):247-256.
- [19] 朱文泉, 潘耀忠, 何浩, 等. 中国典型植被最大光利用率模拟[J]. *科学通报*, 2006(6):700-706.
- ZHU W Q, PAN Y Z, HE H, et al. Simulation of the maximum light utilization rate of typical vegetation in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006(6):700-706.
- [20] ZHANG Y, WANG P, CHEN Y, et al. Daily dynamic thresholds of different agricultural drought grades for summer maize based on the vegetation water index [J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 625: e130070.
- [21] FENG Y, GUO Y, CHEN X, et al. Classification of major crops using MODIS data in the Songhua River basin [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(10):1602-1612.
- [22] LI J, WU R, LI M, et al. The hydrological impact of greening and climate change on the Mu Us Sandy land of China under the background of declining ecological efficiency [J]. *Ecological Indicators*, 2025, 174: e113495.
- [23] 李登科, 王钊. 基于MOD17A3的中国陆地植被NPP变化特征分析[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(3):397-405.
- LI D K, WANG Z. The characteristics of NPP of terrestrial vegetation in China based on MOD17A3 data [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(3):397-405.
- [24] 袁鑫, 黄志炯, 陆梦华, 等. 基于观测和机器学习的珠三角臭氧污染季节特征演变及成因分析[J]. *环境科学学报*, 2023, 43(8):214-225.
- YUAN X, HUANG Z J, LU M H, et al. Seasonal evolution and cause analysis of ozone pollution in the Pearl River Delta based on observation and machine learning [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2023, 43(8):214-225.
- [25] 刘贺, 赵恒谦, 皇甫霞丹, 等. 基于GEE的鄂尔多斯长时序植被NPP时空演变[J]. *干旱区研究*, 2025, 42(2):299-311.
- LIU G, ZHAO H Q, HUANGFU X D, et al. The spatio-temporal evolution of long-term vegetation NPP in Ordos based on GEE [J]. *Arid Zone Research*, 2025, 42(2):299-311.
- [26] ZHAO X Y, TAN S C, LI Y P, et al. Quantitative analysis of fractional vegetation cover in southern Sichuan urban agglomeration using optimal parameter geographic detector model, China [J]. *Ecological Indicators*, 2024, 158: e111529.
- [27] 丁言蕊, 史婧雨, 于欣冉, 等. 京津冀季度PM_{2.5}浓度时空异质性及驱动力解析[J]. *环境科学与技术*, 2025, 48(8):202-212.
- DING Y R, SHI J Y, YU X R, et al. Analysis of spatial-temporal heterogeneity and driving forces of quarterly PM_{2.5} concentrations in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Environmental Science and Technology*, 2025, 48(8):202-212.
- [28] ADLER S J, SHARMA P N, RADOMIR L. Toward open science in PLS-SEM: Assessing the state of the art and future perspectives [J]. *Journal of Business Research*, 2023, 169: e114291.
- [29] 张建国, 李晶晶, 余红兵. 黄河流域黄土高原地区水土流失动态变化及分布特征[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(4):110-116.
- ZHANG J G, LI J J, YU H B. Dynamic changes and distribution characteristics of soil and water loss in Loess Plateau area of Yellow River basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(4):110-116.
- [30] GU Z P, CHEN X W, RUAN W F, et al. Quantifying the direct and indirect effects of terrain, climate and human activity on the spatial pattern of kNDVI-based vegetation growth: A case study from the Minjiang River basin, southeast China [J]. *Ecological Informatics*, 2024, 80: e102493.
- [31] 蒋宁萱, 张涵奇, 孙善磊, 等. 21世纪以来黄土高原水分利用效率时空变化及归因[J]. *生态学报*, 2024, 44(14):6020-6036.
- JIANG N X, ZHANG H Q, SUN S L, et al. Vegetation restoration promoted the increase of water use efficiency on the Loess Plateau in the 21st century [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(14):6020-6036.
- [32] ZHANG Q, LU J, XU X X, et al. Spatial and temporal patterns of carbon and water use efficiency on the Loess Plateau and their influencing factors [J]. *Land*, 2022, 12(1): e77.
- [33] SIDDIQUI M N, LÉON J, NAZ A A, et al. Genetics and genomics of root system variation in adaptation to drought stress in cereal crops [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2021, 72(4):1007-1019.
- [34] 王燕, 邹长新, 林乃峰, 等. 基于生态监管的生态保护修复工程实施成效评估指标体系[J]. *生态学报*, 2023, 43(1):118-127.
- WANG Y, ZOU C X, LIN N F, et al. Ecological supervision oriented evaluation indicator system for performance assessment of ecological protection and restoration project implementation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(1):118-127.