黄土高原生态系统服务功能时空演变特征及其对环境因子的非线性响应机制

刘友林[1], 张 霞[2], 闫 睿[1], 王 周[1],
于坤霞[3], 丛佩娟[4], 李 雪[3], 蒋凯鑫[5], 李 鹏[3]

(1.国家林业和草原局西北调查规划院, 陕西 西安 710048; 2.黄河上中游管理局西安规划设计有限公司, 陕西 西安 710000; 3.西安理工大学 旱区水工程生态环境全国重点实验室, 陕西 西安 710048; 4.水利部 水土保持监测中心, 北京 100053; 5.陕西省水文水资源勘测中心, 陕西 西安 710068)

摘 要: [目的]探究生态恢复与极端气候事件共同作用下多重生态系统服务功能的时空演变规律与驱动机制,为区域生态系统适应性管理与可持续决策提供科学依据。[方法]基于多源遥感与地面观测数据,采用InVEST模型、SHAP-随机森林模型、偏依赖函数、极端降水指数及偏最小二乘结构方程模型,系统评估2000—2024年黄土高原生态系统综合服务指数(ESCI)的时空动态,揭示其驱动机制与非线性响应特征。[结果]①黄土高原生态综合服务指数呈"西南高,东北低"的空间格局,2000—2024年较高及以上等级区域所占比例从11.42%增至38.69%;②黄土高原生态综合服务指数空间分异主要受自然因子控制,干湿指数、高程和降水量的贡献率分别为35.44%,23.67%和13.69%;③黄土高原生态综合服务指数的各主导因子存在明确阈值,干湿指数的生态阈值分别为1.6和4.0,降水量阈值为400 mm,年均温度约3 ℃时生态综合服务指数达峰值,夜间灯光强度阈值为4.0;④极端降水的影响呈现类型异质性,对产水与土壤保持服务有最强正向直接效应,可解释二者变异的62%与61%,对碳固服务影响较弱,对生境质量无显著影响。[结论]黄土高原生态综合服务指数的变化,是由水热条件边界约束、人类活动干扰性质转变以及极端降水对服务类型的差异化影响共同驱动的结果。

关键词: 生态系统服务; 主导因素; 极端降水; 阈值效应; 黄土高原

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)05-0115-10 **中图分类号:** X171.1

文献参数: 刘友林, 张霞, 闫睿, 等.黄土高原生态系统服务功能时空演变特征及其对环境因子的非线性响应机制[J].水土保持通报,2026,46(5):115-124. Liu Youlin, Zhang Xia, Yan Rui, et al. Spatiotemporal evolution characteristics of ecosystem service functions and their nonlinear response mechanisms to environmental factors on Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(5):115-124.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.05.039 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.05.039**

Spatiotemporal evolution characteristics of ecosystem service functions and their nonlinear response mechanisms to environmental factors on Loess Plateau

Liu Youlin[1], Zhang Xia[2], Yan Rui[1], Wang Zhou[1], Yu Kunxia[3], Cong Peijuan[4], Li Xue[3], Jiang Kaixin[5], Li Peng[3]

(1.*Northwest Survey and Planning Institute of the State Forestry and Grassland Administration*, *Xi'an*, *Shaanxi* 710048, *China*; 2.*Xi'an Yellow River Planning and Design Company Limited of the Upper and Middle Yellow River Administration Bureau*, *Xi'an*, *Shaanxi* 710000, *China*; 3.*State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area*, *Xi'an University of Technology*, *Xi'an*, *Shaanxi* 710048, *China*; 4.*Soil and Water Conservation Monitoring Center*, *Ministry of Water Resources*, *Beijing* 100053, *China*; 5.*Shaanxi Hydrological and Water Resources Survey Center*, *Xi'an*, *Shaanxi* 710068, *China*)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal evolution patterns and driving mechanisms of multiple ecosystem service functions under the combined effects of ecological restoration and extreme climate events were investigated

收稿日期:2026-01-06 **修回日期:**2026-04-01 **采用日期:**2026-04-10

资助项目:国家自然科学基金项目"黄土高原植被生产力对干旱高温复合胁迫响应机制研究"(52579021); 国家重点研发计划项目(2024YFF1306303)

第一作者:刘友林(1970—),男(汉族),江苏省泰州市人,本科,高级工程师,主要从事森林资源调查监测与评价。Email:3159735551@qq.com。

通信作者:于坤霞(1989—),女(汉族),河南省长垣市人,博士,教授,主要从事生态水文研究。Email:yukunxia@126.com。

in order to provide a scientific basis for regional adaptive ecosystem management and sustainable decision-making. [Methods] Based on multi-source remote sensing and ground-based observational data, this study systematically assessed the spatiotemporal dynamics of the ecosystem service composite index (ESCI) across the Loess Plateau from 2000 to 2024 using the InVEST model, a random forest model coupled with SHAP, partial dependence analysis, extreme precipitation indices, and partial least squares structural equation modeling. The underlying driving mechanisms and nonlinear response characteristics were further revealed. [Results] ① The ESCI exhibited a spatial pattern characterized by higher values in the southwest and lower values in the northeast. The proportion of areas classified as relatively high or higher increased from 11.42% in 2000 to 38.69% in 2024. ② The spatial differentiation of ESCI was primarily controlled by natural factors, with the aridity index, elevation and precipitation contributing 35.44%, 23.67% and 13.69%, respectively. ③ Clear thresholds were identified for the dominant factors of ESCI. The aridity index had two ecological thresholds at 1.6 and 4.0, while the precipitation threshold was 400 mm. ESCI reached its peak when the annual average temperature was approximately 3 ℃, and the threshold for nighttime light intensity was 4.0. ④ Extreme precipitation exhibited heterogeneous effects across ecosystem service types. It had the strongest positive direct effects on water yield and soil conservation services, explaining 62% and 61% of their variance, respectively. Its effect on carbon sequestration was relatively weak, whereas no significant effect on habitat quality was detected. [Conclusion] Changes in ESCI across the Loess Plateau are jointly driven by hydrothermal constraints, shifts in the nature of human activity disturbances, and the differentiated effects of extreme precipitation on service types.

Keywords: ecosystem services; dominant factors; extreme precipitation; threshold effect; Loess Plateau

生态系统服务功能是区域生态安全与可持续发展的重要保障,在维系水资源供给、土壤保育、生物多样性维护及气候调节等方面发挥着不可替代的作用[1]。黄土高原作为中国典型的生态脆弱区与关键的水土保持功能区,其生态系统服务功能的变化直接关系黄河流域的生态安全与高质量发展[2]。近20 a来,在退耕还林还草等大规模生态恢复工程的推动下,区域植被覆盖状况显著改善,生态系统服务功能得到整体提升[3]。然而,在全球气候变化背景下,极端气候事件频发与持续的人类活动干扰相互叠加,对该区域多重生态系统服务功能的稳定性与可持续性构成了新的挑战[4]。明确黄土高原生态系统综合服务功能的演变规律及其对多重驱动因子的非线性响应机制,已成为当前区域生态学研究的重要前沿。

在生态系统服务功能评估方面,以InVEST模型为代表的量化工具已被广泛应用于产水、土壤保持、碳固存与生物多样性维持等多种服务的空间化模拟[5]。在驱动机制研究中,学者普遍认识到自然因子与人类活动共同影响着生态系统服务功能的空间格局与动态变化,其中气候条件、地形特征与土地利用方式被认为是关键驱动因素[6-7]。然而,现有研究多集中于线性相关分析或单一因子的贡献排序[8],对多因子间的非线性交互作用、生态系统服务对驱动因子的阈值响应规律,以及不同类型生态系统服务功能对极端气候事件的差异化响应机理等方面,仍缺乏系统的量化解析。这一局限在一定程度上影响了对区域生态系统服务稳定性维持机制的深入理解,也制约了基于过程的精细化生态管理策略的制定。为弥补以上研究不足,本研究以黄土高原为研究区,集成多源遥感与地面观测数据,重点开展以下研究:揭示2000—2024年黄土高原生态系统综合服务功能的时空演变格局与变化趋势;识别黄土高原生态系统综合服务功能的关键驱动因子并解析其相对贡献;量化各主导因子对生态系统综合服务功能的非线性影响及阈值效应;阐明极端降水对不同类型生态系统服务功能的差异化影响路径与机理。本研究旨在从“格局-过程-机制”多维度探究生态恢复与气候变化双重背景下黄土高原生态系统服务功能动态变化,以期为区域生态系统适应性管理与可持续决策提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黄土高原是中国重要的生态过渡区,地跨青海、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南7个省区[9]。黄土高原地处黄河中游,具有典型的温带大陆性季风气候特征,自东南向西北依次呈现半湿润、半干旱并向高原气候过渡的趋势,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥[10]。高程介于84～6 250 m,年均降水量为107～896 mm,年均气温－12.73～15.35 ℃。土地利用以耕地、林地和草地为主(图1)。

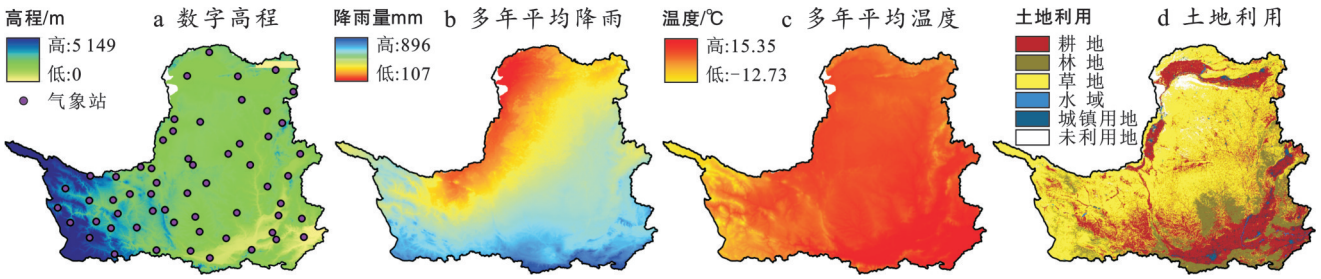


图 1　黄土高原概况

Fig.1　Overview of Loess Plateau

1.2　数据来源

本研究涉及的全部栅格数据均统一处理为 1 km 空间分辨率,时间范围均为 2000—2024 年。①高程数据来源于资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)。土地利用数据采用 Yang Jie 等[11]基于 Google Earth Engine 平台构建的 30 m 分辨率中国年度土地覆盖数据集(2000—2024 年),数据集分类精度经过验证,研究中将其重分类后使用。②降水与温度数据来自国家地球系统科学数据中心(https://www.geodata.cn/oldindex.html),该数据集已通过全国 496 个独立气象站观测资料验证,结果可靠。黄土高原区域内 58 个气象站的逐日观测资料来源于国家气象信息中心的中国地面气候资料日值数据集(V 3.0)。潜在蒸散发量采用 Penman-Monteith 公式计算,并利用 ANUSPLIN 软件进行空间插值,生成空间分布数据[12]。③归一化植被指数(NDVI)数据采用 NASA 发布的 MOD13Q1 产品(https://www.nasa.gov/),经波段提取、格式转换与年最大值合成,得到年尺度 NDVI 数据集。植被净初级生产力(NPP)数据来源于 NASA MOD17A3 产品,研究证实其可有效反映区域植被净初级生产力,数据精度可靠[13]。④夜间灯光数据使用国家地球系统科学数据中心提供的“类 NPP-VIIRS”夜间灯光融合数据集。人口密度数据来源于 WorldPop 人口栅格数据集(https://hub.worldpop.org/)。

2　材料与方法

2.1　生态系统服务量化

为综合评估黄土高原生态系统服务状况,本研究选取产水服务、土壤保持、生境质量与固碳服务 4 项服务指标(表 1),构建生态系统综合服务指数(ESCI)[14],用以分析 2000—2024 年黄土高原生态系统服务的时空变化特征。计算公式为

$$ES_b=\frac{ES-ES_{min}}{ES_{max}-ES_{min}} \tag{1}$$

$$ESCI=\sum_{i=1}^{n}ES_{bi} \tag{2}$$

式中:ESCI 为生态系统综合服务指数(无量纲);ES_{bi} 为第 i 类生态系统服务的标准化结果(无量纲);ES_b 为生态系统服务标准化值(无量纲),由相应服务的初始值(ES)经极差标准化计算得到;ES_{max},ES_{min} 分别为该服务的最大值与最小值(无量纲)。

为清晰揭示黄土高原生态系统综合服务水平的时空分异特征,本研究将生态系统综合服务指数(ESCI)划分为 5 个等级[15]:低值(0~0.30)、较低值(0.30~0.40)、中值(0.40~0.50)、较高值(0.50~0.60)和高值(>0.60)。

表 1　生态系统服务功能指标计算方法

Table 1　Calculation methods for ecosystem service function indicators

生态系统服务指标	公式	公式注释	指标描述
产水服务(WY)	$Y(x)=\left[1-\frac{AET(x)}{P(x)}\right]\cdot P(x)$	AET(x)为实际蒸散发(mm);$P(x)$为降雨量(mm)。	InVEST 模型的 Water Yield 模块计算产水服务[16]
土壤保持(SC)	$SC=R\cdot K\cdot L\cdot S\times(1-C\cdot P)$	SC 为土壤保持量[t/(hm²·a)];R 为降雨侵蚀力因子;K 为土壤可蚀性因子;L 为坡长因子;S 为坡度因子。	InVEST 模型的沉积物输送率模块量化土壤保持能力[17]
生境质量(HQ)	$Q_{xj}=H_j\left[1-\left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z+k^z}\right)\right]$	Q_{ij}为 j 土地覆盖类型中栅格 x 的生境质量;H_j表示 i 土地覆盖类型的本底生境适宜性;D_{xj}表示生境退化度。	InVEST 模型的生境质量模块进行估算[18]
固碳服务(CS)	Net Primary Productivity, NPP	用植被净初级生产力为固碳服务评估指标[19]	

2.2 趋势分析

Theil-Sen中位数估计与Mann-Kendall检验相结合,可在时间序列趋势分析中实现稳健性与高效性,显著降低异常值干扰[20]。本研究针对黄土高原生态系统服务时序变化,采用Theil-Sen中位数方法量化年度趋势,计算公式为

$$\beta = \mathrm{median}\left(\frac{X_j - X_i}{j - i}\right), \quad \forall_j > i \tag{3}$$

式中:β为变量的趋势斜率(a^{-1});median为中位数运算;X_j,X_i分别为第j年和第i年变量的观测值;$\forall$为对所有满足条件的年份组合进行计算;若$\beta>0$,表明为增长趋势,反之为下降趋势。

采用Mann-Kendall检验评估上述趋势的统计显著性。基于趋势方向与显著性水平,将生态系统服务功能变化划分为轻微退化、显著退化、稳定不变、轻微改善和显著改善5种类型(表2)。

表2 趋势变化特征

Table 2 Characteristics of trend changes

β值	Z值	趋势特征
$\beta>0$	$1.96<Z$	显著改善
	$1.96>Z$	轻微改善
$\beta=0$	—	稳定不变
$\beta<0$	$1.96>Z$	轻微退化
	$1.96<Z$	显著退化

2.3 SHAP解释的随机森林模型

随机森林模型是基于分类回归树的集成学习框架,可在捕捉复杂非线性关系的同时有效抑制过拟合并维持高效的数据挖掘性能[21]。本研究选取地形、气候、植被与人类活动4类共9个环境因子(表3),借助ArcGIS渔网工具将黄土高原划分为3 021个等面积网格,提取各网格对应的环境因子,以生态系统综合服务指数为响应变量构建随机森林回归模型。数据按75%∶25%的比例划分为训练集与测试集,检验模型的拟合精度与泛化能力。

SHAP(SHapley Additive exPlanations)以合作博弈论中的Shapley值为基础,通过量化各特征对模型输出的边际贡献,将预测结果分解为各输入特征贡献之和。该方法不仅能够识别不同特征对单个样本预测结果的贡献方向与大小,还可通过汇总全部样本的SHAP值衡量各特征的总体解释度,从而为随机森林模型提供具有一致性和局部可加性的解释,其具体计算公式参见文献[22]。

表3 环境因子

Table 3 Environmental factors

类 型	环境因子
气 候	降水量(Pre)
	温度(Temp)
	干湿指数(AI)
地 形	高程(Dem)
	坡度(Slope)
	坡向(Aspect)
植 被	NDVI
人类活动	人口密度(Pop)
	夜间灯光(NLI)

注:干湿指数(AI)为潜在蒸散发与降水量的比值。

2.4 极端降水指标提取

本研究为分析黄土高原不同极端降雨事件对生态系统服务功能的影响,参照世界气象组织定义,选取7个极端降水指标[23]。基于研究区内58个气象站2000—2024年的逐日降水数据,计算得到各项极端降水指标(表4)。R95p(强降雨量)与R99p(极端降雨量)的气候基准期设定为2000—2010年,其余指标为绝对值指标,计算不涉及基准期。

表4 极端降水指数

Table 4 Extreme precipitation indices

指 数	缩 写	定 义
最大1 d降雨量/mm	Rx1day	年内日降雨量最大值
最大5 d降雨量/mm	Rx5day	年内最大连续5 d降雨量总和
强降雨量/mm	R95p	日降雨量大于基准期内95百分位值的降雨量总和
极端降雨量/mm	R99p	日降雨量大于基准期内99百分位值的降雨量总和
总降雨量/mm	PRCpTOT	日降雨量≥1 mm的年降雨量总和
日降雨量≥10 mm天数/d	R10	日降雨量≥10 mm的日数
日降雨强度/(mm·d^{-1})	SDII	年总降雨量除以总降雨日数

2.5 偏最小二乘结构方程

偏最小二乘结构方程模型适用于小样本、多变量的探索性研究,兼具主成分分析与路径分析的特点,具有较好的稳健性与灵活性[24]。本研究应用模

型解析极端降水对生态系统服务功能的影响路径。极端降水作为模型的外生潜在变量,由对应的7个极端降水指标进行测量,生态系统服务功能指数作为内生潜在变量,以空间结果作为观测变量。采用反映型测量模式连接观测变量与潜在变量,建立极端降水至各服务变量的影响路径。模型参数通过偏最小二乘回归估计,路径系数显著性用Bootstrap法重复抽样1 000次进行检验。同时通过因子载荷、平均方差抽取量评估测量模型质量,并通过内生潜变量的解释方差评估模型的预测能力。

3　结果与分析

3.1　生态系统服务功能时空演变

黄土高原生态综合服务指数的空间格局呈现西南高,东北低的分布特征。2000—2024年区域生态系统服务整体水平持续提升。低值区面积比例从2000年的43.29%下降至2024年的14.24%,较高及以上等级区域比例从11.42%上升至38.69%,其中高值区占比在2024年达到17.63%,较2000年显著扩大。空间上北部地区如库布其沙漠、毛乌素沙地周边地形起伏大,气候干旱,极端气候事件频发,生态系统服务功能整体较弱。尽管退耕还林还草、淤地坝建设等生态工程实施后该区域生态系统服务功能有所改善,但仍显著低于水热条件较好的南部地区。南部降水相对充沛且分布均匀,植被状况良好,生态系统服务功能普遍较高(图2)。从年际变化看,2000—2024年生态系统服务功能整体呈波动上升趋势,其中2000—2010年持续增强,2010—2015年略有回落,2015—2024年迅速恢复并超过此前水平,表明区域生态系统服务功能总体向好发展(图3)。

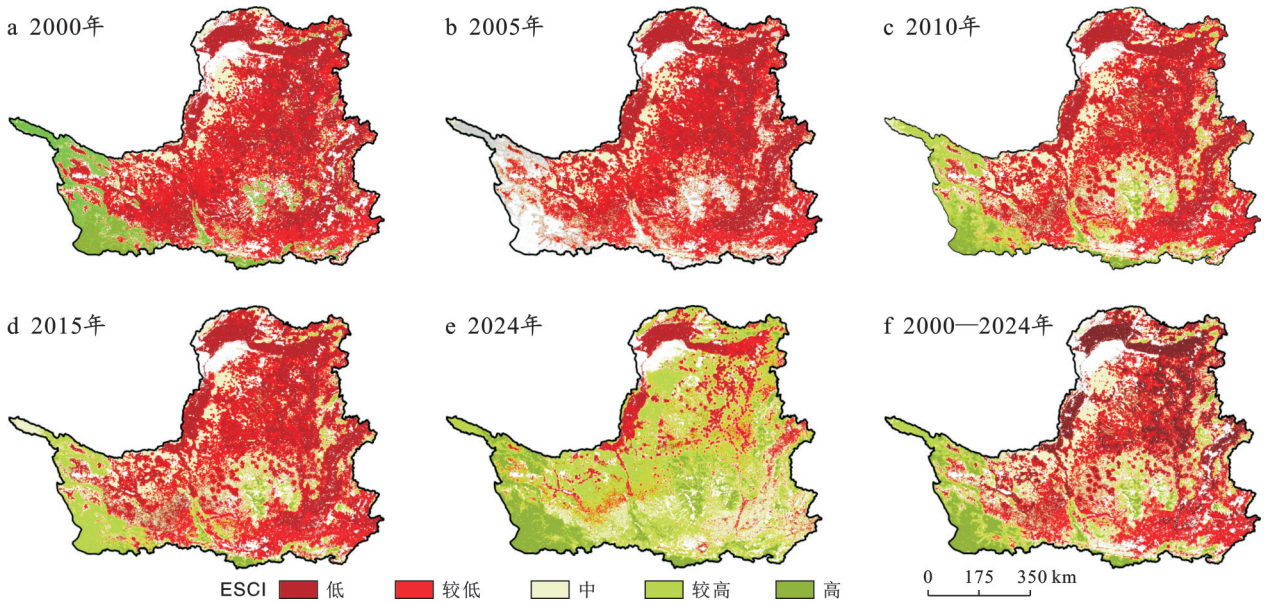


图2　黄土高原生态系统综合服务功能(ESCI)空间分布

Fig.2　Spatial distribution of comprehensive ecosystem service functions (ESCI) of Loess Plateau

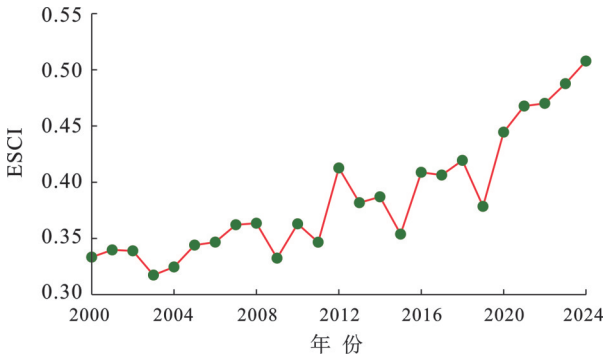


图3　黄土高原生态系统综合服务功能(ESCI)年际变化

Fig.3　Interannual variation of comprehensive ecosystem service functions (ESCI) of Loess Plateau

2000—2024年黄土高原生态系统服务功能以改善为主导趋势,78.52%的区域服务能力呈改善态势,显著改善区占57.66%,退化区域仅占6.41%。显著改善区分布于中部的黄土丘陵沟壑区,该区域是退耕还林还草等生态工程的重点实施区,生态工程带来的植被恢复与水土保持效应显著。生态系统服务功能退化区主要集中在东南部,该区水热条件相对优越,但快速城镇化推进与农业集约化发展,造成生态空间破碎化与生境质量持续降低,人类活动的负面效应在局部超过了自然本底优势与生态工程的正向效益,最终表现为生态系统服务功能下降(图4)。

这与以生态恢复为主导的中部地区形成对比，表明在自然条件相对优越但人类干扰剧烈的区域，人类活动可取代自然条件成为生态系统服务功能退化的主导驱动力。

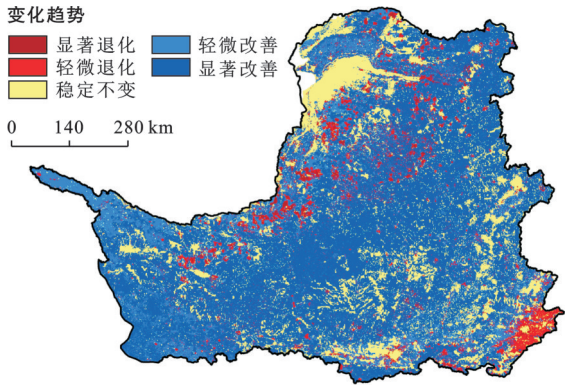


图 4 黄土高原生态系统综合服务功能变化趋势

Fig.4 Change trend of comprehensive ecosystem service functions of Loess Plateau

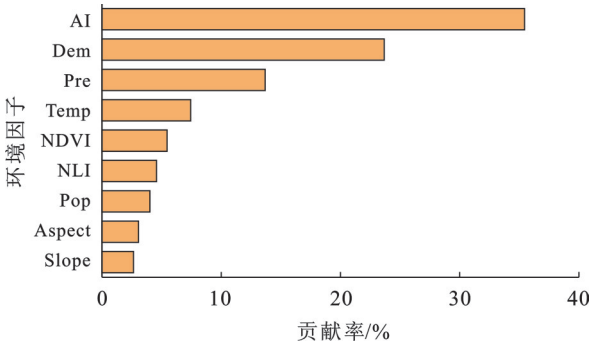
3.2 生态系统服务功能主导因素识别

本研究选取 9 个环境因子作为自变量，构建黄土高原生态系统综合服务功能的随机森林模型，并采用 SHAP 方法定量评估各因子的贡献度，以识别影响生态系统服务变化的主导因素。结果显示，自变量对生态系统综合服务功能的整体解释率超过 75%。模型在训练集上的拟合优度（R^2）为 0.96，测试集 R^2 为 0.78，表明该随机森林模型具有较好的拟合能力与泛化性能，适用于本研究中的影响因素识别与重要性分析。

黄土高原生态系统服务功能空间分异的驱动因子贡献率排序结果表明，干湿指数（AI）的贡献率最高，达到 35.44%。高程（Dem）的贡献率为 23.67%，降水量（Pre）的贡献率为 13.69%，温度（Temp）的贡献率为 7.44%。自然地理因子累计贡献率占主导地位。植被指数（NDVI）的贡献率为 5.46%，夜间灯光强度指数（NLI）的贡献率为 4.58%，人口密度（Pop）的贡献率为 4.02%，此组因子表征植被与人类活动，其解释力相对有限。坡向（Aspect）与坡度（Slope）的贡献率最低，分别为 3.06% 和 2.64%（图 5）。气候干旱程度是黄土高原生态系统综合服务功能空间分异的首要驱动力，地形与水热条件构成基础控制框架，其他因子作用相对次要。

3.3 生态系统服务功能主导因素阈值量化

上述分析能够识别影响黄土高原生态系统服务功能的主导因子，并量化其相对贡献率，但尚不足以揭示各因子变化对区域生态系统服务功能趋势的具体影响。考虑到影响因素与生态系统服务功能之间普遍存在非线性关系及可能的阈值效应，本研究进一步选取贡献度最高的 6 个因子，通过构建偏依赖函数，以揭示主导因子对黄土高原年均生态系统服务功能的响应关系及其关键阈值。



注：各环境因子缩写含义详见表 3。

图 5 黄土高原生态系统服务功能驱动因子解释度

Fig.5 Explanatory power of driving factors for ecosystem service functions of Loess Plateau

由图 6 可知，干湿指数（AI）对生态系统服务功能的影响表现为先快速下降后趋于稳定的饱和特征。当 AI 低于 1.6 时，生态系统服务功能维持在较高水平；AI 超过 1.6 后，生态系统服务功能迅速下降至约 0.35；AI 大于 4.0 后，其变化对生态系统服务功能的影响逐渐平缓（图 6a）。高程对生态系统服务具有正向驱动作用，生态系统服务随高程升高从 0.30 增至 0.50 以上，高程超过 3 000 m 后逐渐趋于稳定（图 6b）。降水量对生态系统服务功能的影响存在明显阈值。当降水量低于 400 mm 时，生态系统服务功能随降水量增加而提升；超过 400 mm 后，提升趋势显著减缓；当年降水量达到 600 mm 以上时，生态系统服务功能趋于稳定并呈现下降态势（图 6c）。温度对生态系统服务功能的影响呈单峰型，当年均温度低于 3 ℃时，生态系统服务功能随温度升高而增加，并在约 3 ℃时达到峰值，此后随温度继续升高而下降（图 6d）。植被条件与生态系统服务功能呈近似线性正相关关系，植被改善显著提升了生态系统服务功能（图 6e）。夜间灯光强度指数低于 4.0 时，生态系统服务功能随其增强而显著提高；强度超过 4.0 后，提升趋势减缓并呈波动上升；强度超过 30 后，生态系统服务功能逐渐趋于稳定（图 6f）。

3.4 生态系统服务功能对极端降水的响应

本研究采用偏最小二乘法结构方程模型解析了极端降水对 4 项生态系统服务功能及生态系统综合服务功能的影响（图 7）。结果显示，极端降水对产水服务、碳固存、土壤保持及生态系统综合服务功能具有显著影响，但对生境质量的影响不显著。7 项极端

降水指标共同解释了产水量变异的62%,碳固存的35%,土壤保持的61%以及生态系统综合服务功能的47%。其中,极端降水对产水量的正向影响最大,路径系数为0.77($p<0.001$),表明极端降水显著增加黄土高原的产水量。其对土壤保持也具有较强的正向影响,路径系数为0.74($p<0.001$),说明降水主要通过侵蚀与沉积过程影响土壤保持能力。极端降水对碳固存的影响相对较弱,路径系数为0.55($p<0.01$)。相比之下,极端降水对生境质量的影响较弱且未达到显著水平(路径系数=0.41,$p>0.05$)。

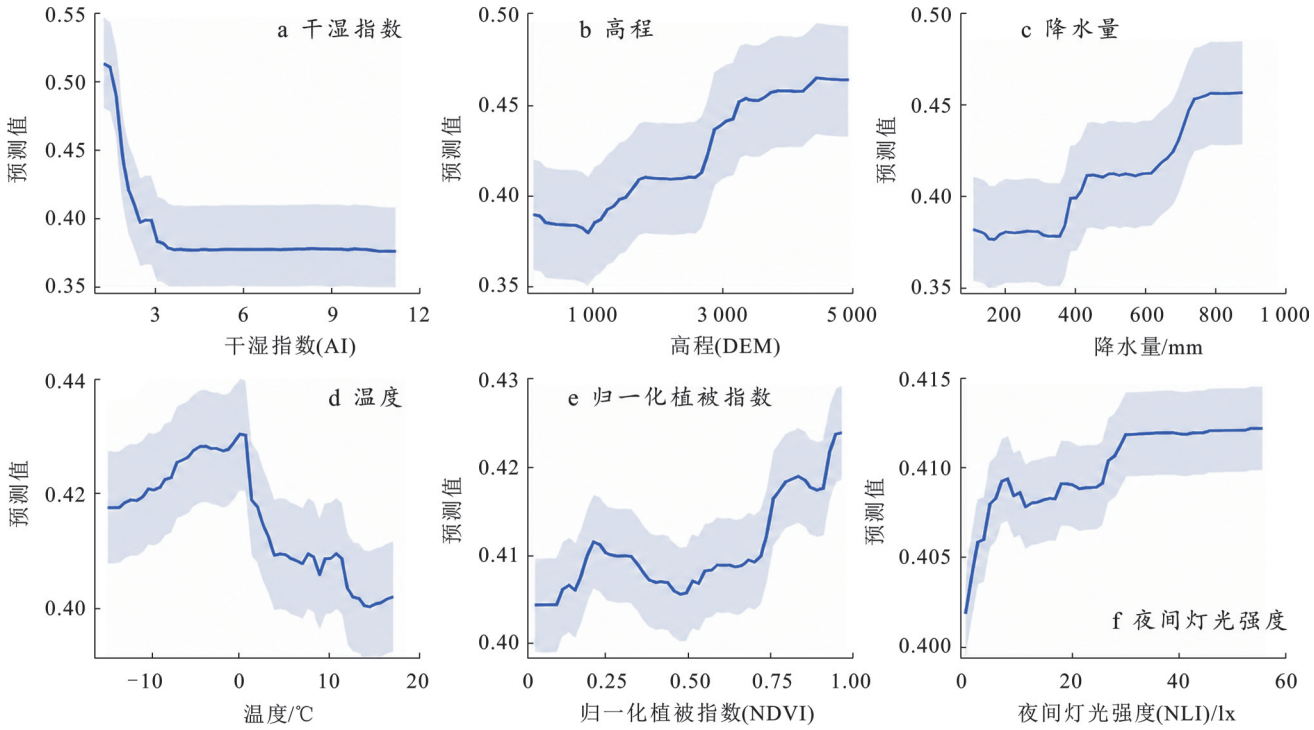
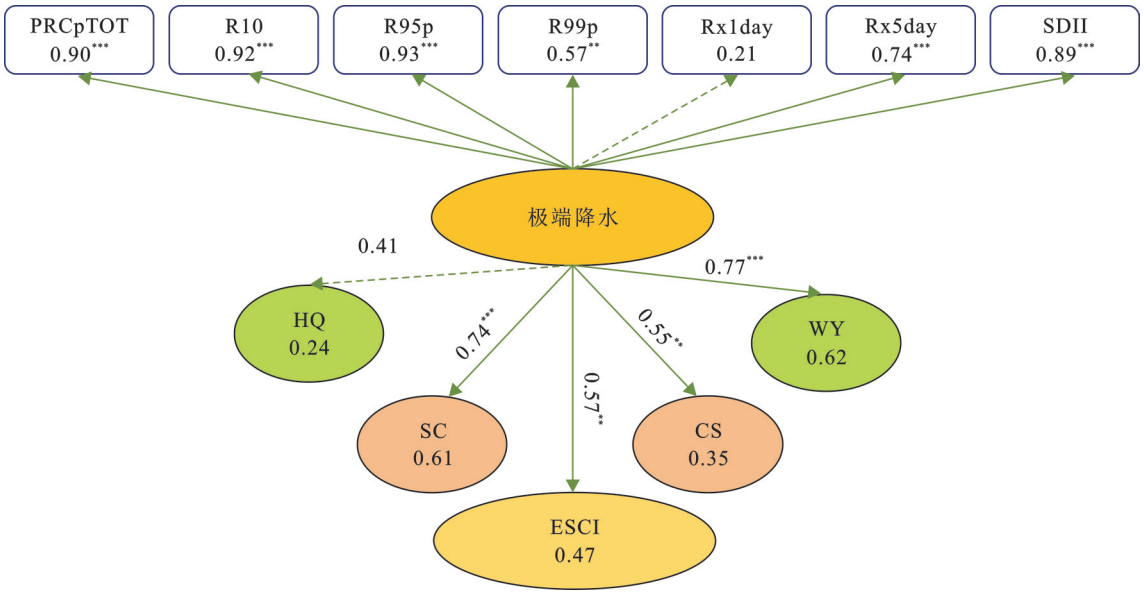


图6　生态系统服务功能主导因子的阈值效应

Fig.6　Threshold effects of dominant factors on ecosystem service functions



注:*,**,***分别表示通过95%,99%和99.9%的显著性检验;无*表示未通过显著性检验。

图7　极端降水指标与生态系统服务指数结构方程模型

Fig.7　Structural equation model of extreme precipitation indicator and ecosystem service indices

各项极端降水指标对极端降水总体变异均具有较好的解释力。其中,极端降水总量(PRCpTOT)、强降水日数(R10)与极端降水阈值(R95p)对潜变量的载荷系数分别达到0.90,0.92和0.93,且均通过显

著性水平检验，表明这些指标在表征极端降水对生态系统服务功能的综合影响中具有关键作用。相比之下，单日最大降水量（Rx1day）的载荷系数仅为0.21且未达到显著水平，说明其在模型中的解释能力有限，对生态系统服务功能的影响相对较小。

4 讨 论

4.1 主导因子生态阈值的成因机制

干湿指数（AI）所呈现的1.6和4.0两个关键阈值，分别对应区域植被水分利用策略发生转变的生态临界点。AI低于1.6时，水分条件尚可支持以乔灌为主、具有较高生态功能的植被类型，超过阈值后，水分胁迫加剧，植被向以草本或耐旱灌木为主的退化类型转变，导致生态系统服务功能下降，AI大于4.0后，生态系统进入以极度耐旱物种为主的、服务功能低水平稳态[25]。降水量400 mm的拐点与黄土高原半干旱与半湿润气候的分界线吻合，证实了该降水量是维持较高水平生态系统服务的基础水资源保障线[26]。当遭遇连续降水偏少年份时，水热条件的短期不利波动会抑制土壤保持、产水等相关服务，致使生态系统综合服务指数出现阶段性回落。年均温度约3 ℃的峰值拐点，反映了温度升高对植被生长的双重效应：在低于此阈值时，升温促进植物代谢与生长；超过阈值后，温度升高通过加剧蒸散，引发水分胁迫或改变土壤微生物活性，抵消正面效应，导致服务能力下降[27]。

城镇化发展对生态系统服务功能的调控作用可通过夜间灯光强度呈现出显著的阶段性分异特征。夜间灯光强度低于4.0时，区域以农村聚居与农业生产为主，退耕还林还草、流域水土保育等生态保护政策的实施强化了区域植被管护与生态修复力度，对生态系统服务功能有提升作用。夜间灯光强度高于4.0的区域，城镇化进程加快引发城镇建设用地扩张，自然植被被持续挤占，生态系统服务功能的提升趋势受到明显抑制[28]。夜间灯光强度高于30.0的区域受高度城镇化主导，自然生态系统逐步转换为城镇人工生态系统，服务功能主要依托城市绿地、公园等人工生态空间维持相对稳定的水平[29]。

干湿指数大于1.6的区域，生态修复策略应转向以水土保育和稳定生态系统为核心，避免单纯追求植被覆盖度的提升。在年均温接近或超过3 ℃的地区，需关注未来增温可能导致的生态系统服务衰减风险，并提前布局适应性管理措施；对于城镇化强度的调控，应力求将夜间灯光强度控制在4～30 lx以内，以延缓其对自然生态功能的侵蚀进程，防止区域进入高干扰强度的转型区间。

4.2 生态系统服务功能对极端降水响应的异质性机理

极端降水对产水服务与土壤保持服务表现出最强的正向驱动作用。这一结果与黄土高原的地貌、土壤及水文特征高度契合。黄土高原土质疏松、植被覆盖度低，极端降雨事件极易形成高强度地表径流，直接增加流域产流量，从而解释了其对产水量高达62%的变异解释度[30]。强降水是驱动土壤水蚀的主要动力，显著影响土壤保持模块中估算的侵蚀与沉积过程，致使极端降水对土壤保持能力同样表现出高达0.74的直接影响路径系数[31]。在黄土高原这一生态脆弱区，极端降水主要通过水文与地貌过程主导着产水与土壤保持这两类服务的短期动态[32]。

极端降水对碳固存的正向影响相对较弱，这源于植被固碳过程对降水的响应更为复杂且存在时滞。一方面，降水增加有利于植被生长，从而提高NPP，另一方面，极端降水事件可能通过引发洪涝、土壤冲刷等对植物生长产生胁迫，或通过改变云量影响光合有效辐射，其净效应在不同情景下存在不确定性[33]。模型结果表明，极端降水是影响碳固存的重要但非唯一主导因素，温度、日照、养分状况等其他因子共同调节着其最终影响。

极端降水对生境质量的影响未达到统计显著水平，这是由于生境质量评估的是特定土地利用类型对人类活动干扰的“脆弱性”或“适宜性”，其计算更侧重于生境的静态结构和组成，而对动态的气候胁迫响应不如产水、侵蚀等过程敏感[34]。生境质量的变化更多地由长期、累积性的人类土地利用变化所驱动，而对单次或年际极端降水事件的直接响应相对迟缓，导致在年际尺度上关联性不显著。这表明在黄土高原，人类活动是短期内改变生境质量的主导力量，而极端气候事件的影响可能需要通过长期、间接的生物地球化学循环或群落演替过程才能显现[35]。

在极端降水的表征指标中，累积性指标（PRCpTOT，R10，R95p）展现出比瞬时性指标（Rx1day）更强的解释力，对黄土高原生态系统服务而言，强降水事件的累积效应比单次最大降雨强度的影响更为关键。区域生态风险管理应更关注极端降水的频次与总量，而不仅是瞬时峰值。

5 结 论

（1）黄土高原生态系统服务功能呈“西南高，东北低”的空间格局，2000—2024年服务能力显著提

升,较高及以上等级区域面积比例从11.42%增至38.69%。

(2)黄土高原生态系统服务功能的空间分异主要受自然因子控制,干湿指数(35.44%)、高程(23.67%)与降水量(13.69%)的贡献率合计超过70%,人类活动的影响尚未超越自然本底约束。

(3)黄土高原生态系统服务功能对关键驱动因子的响应存在明确的阈值效应。干湿指数、降水量、年均温度与夜间灯光强度的响应拐点分别为1.6,400 mm,3 ℃和4.0 lx。生态系统服务并非随驱动因子呈线性变化,而是在跨越特定临界点后发生状态转换。

(4)极端降水对生态系统服务功能的影响呈现类型异质性,对产水和土壤保持服务具有最强的正向直接驱动效应,对固碳的影响相对较弱,对生境质量则无显著影响。

本研究同样存在一定局限,遥感数据的分辨率与精度对微观异质性的刻画存在约束,驱动分析中对人类活动的表征仍可进一步细化。当前分析主要集中于极端降水的影响,尚未系统纳入干旱、高温等其他类型的极端气候事件。黄土高原南北部的主导侵蚀过程具有显著差异,南部以水力侵蚀为主,北部风力侵蚀作用更为突出。本研究在评估土壤保持功能时主要聚焦于水蚀过程,未能将风蚀机制纳入统一框架,这可能使得对风蚀主导区域的土壤保持功能评估不够完整。未来研究可通过融合多源高分辨率数据,构建耦合水蚀与风蚀过程的综合评估模型,并系统开展多类型极端气候事件的复合生态效应分析,从而更全面地揭示变化环境下生态系统服务功能的响应机制。

参考文献(References)

[1] Gong Daohong, Huang Min, Ge Yong, et al. Operationalizing SDGs through the water-energy-food nexus: Multi-level assessment of ecosystem service supply-demand patterns in China [J]. Ecological Indicators, 2025,179:114235.

[2] 赵雪雁,马平易,李文青,等.黄土高原生态系统服务供需关系的时空变化[J].地理学报,2021,76(11):2780-2796.
Zhao Xueyan, Ma Pingyi, Li Wenqing, et al. Spatiotemporal changes of supply and demand relationships of ecosystem services in the Loess Plateau [J]. Acta Geographica Sinica, 2021,76(11):2780-2796.

[3] Zhang Yi, Wang Zhihui, Shi Xiaogang, et al. Impacts of climate change and vegetation greening driven by natural and anthropogenic factors on carbon sink in Chinese Loess Plateau after ecological restoration [J]. Catena, 2025,258:109310.

[4] Dee L E, Miller S J, Helmstedt K J, et al. Quantifying disturbance effects on ecosystem services in a changing climate [J]. Nature Ecology & Evolution, 2025,9(3):436-447.

[5] Veisi Nabikandi B, Hami A, Valizadeh Kamran K, et al. Evaluating urban ecosystem services and resilience using remote sensing and InVEST model: A case study of flood risk control and urban cooling in Tabriz [J]. Sustainable Cities and Society,2025,130:106654.

[6] Chen Dengshuai, Li Xin, Li Ting, et al. Exploring spatio-temporal heterogeneity of ecosystem service interactions in rapidly urbanizing areas: Trade-offs/synergistic changes and their driving mechanisms [J]. Ecological Indicators,2025,181:114400.

[7] Wu Qing, Cao Yu, Su Dan, et al. A multi-scale framework for understanding spatial scale effects on ecosystem service heterogeneity,interactions, drivers and their socio-ecological impact pathways for adaptive management [J]. Journal of Cleaner Production, 2025,516:145757.

[8] He Liujie, Xie Zeyang, Wu Hanqing, et al. Exploring the interrelations and driving factors among typical ecosystem services in the Yangtze River economic belt, China [J]. Journal of Environmental Management, 2024, 351:119794.

[9] 杨梅焕,陶冰玉,王涛,等.黄土高原植被NEP时空变化及对气温降水和退耕还林(草)的响应[J].水土保持学报,2026(2):405-416.
Yang Meihuan, Tao Bingyu, Wang Tao, et al. Spatiotemporal variation of vegetation NEP on Loess Plateau and its responses to temperature, precipitation, and grain-for-green program [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026(2):405-416.

[10] 刘哲琼,佘敦先,夏军,等.黄土高原地区气象干旱动态格局演变及其对植被的影响[J].地理科学,2023,43(9):1659-1671.
Liu Zheqiong, She Dunxian, Xia Jun, et al. Impacts of meteorological drought on vegetation and their dynamic pattern evolutions on the Loess Plateau [J]. Geographical Science,2023,43(9):1659-1671.

[11] Yang Jie, Huang Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. Earth System Science Data, 2021,13(8):3907-3925.

[12] 高峥,刘赛艳,解阳阳,等.不同季节潜在蒸散发变化的不确定性特征[J].地理学报,2025,80(7):1757-1770.
Gao Zheng, Liu Saiyan, Xie Yangyang, et al. Uncertainty characteristics of potential evapotranspiration in different seasons [J]. Acta Geographica Sinica, 2025,

80(7):1757-1770.

[13] Li Xue, Yu Kunxia, Xu Guoce, et al. Exploring ecosystem service dynamics and drivers in the upper and middle Yellow River basin under large-scale ecological restoration [J]. Ecological Engineering, 2025, 217: 107643.

[14] Bai Juan, Wang Xiaofeng, Tu You, et al. Integration of ecosystem service composite index and driving thresholds for ecological zoning management: A case study of Qinling-Daba Mountain, China [J]. Journal of Environmental Management, 2025,384:125309.

[15] Li Xue, Yu Kunxia, Xu Guoce, et al. Quantifying thresholds of key drivers for ecosystem health in large-scale river basins: A case study of the upper and middle Yellow River [J]. Journal of Environmental Management, 2025,383:125480.

[16] 夏鸿华,杨林山,冯起,等.石羊河流域产水服务供需时空变化及驱动因子[J].中国沙漠,2024,44(6):87-99.
Xia Honghua, Yang Linshan, Feng Qi, et al. Spatiotemporal variation and driving factors of water supply and demand in Shiyang River basin [J]. Journal of Desert Research, 2024,44(6):87-99.

[17] Li Hucheng, Chen Jianjun, Ling Ming, et al. A framework for dynamic assessment of soil erosion and detection of driving factors in alpine grassland ecosystems using the RUSLE-InVEST (SDR) model and Geodetector: A case study of the source region of the Yellow River [J]. Ecological Informatics, 2025,85:102928.

[18] Zou Menghuan, Qiang Fangfang, Yu Xuejiao, et al. Impact of ecological restoration projects on watershed habitat quality in the Loess Plateau of China: A case study of the Yanhe River basin [J]. Ecological Indicators, 2025,180:114351.

[19] Ma Yuhe, Chen Hai, Yang Miaomiao, et al. Ecological compensation based on multiscale ecosystem carbon sequestration service flow [J]. Journal of Environmental Management, 2024,372:123396.

[20] Wen Chunhui, Long Tengfei, He Guojin, et al. Temporally enhanced RSEI and nighttime lights reveal long-term ecological changes and effective protection in China's Inaugural National Parks [J]. Ecological Indicators, 2025,170:112981.

[21] Huang Chenyao, She Dunxian, Liu Xinbo, et al. Predicting future meteorological drought risk in mainland China using random forest model [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies,2025,61:102633.

[22] Qi Mengjuan, Guo Luo, Liu Wenshu, et al. Climate drivers of forest ecosystem services supply in the hilly mountainus regions of southern China based on SHAP-enhanced machine learning [J]. Ecological Indicators, 2025,178:114085.

[23] 张昕晗,赵文婷,焦菊英,等.1960—2023年黄土高原极端降水事件时空演变特征[J].干旱区地理,2025,48(7):1153-1166.
Zhang Xinhan, Zhao Wenting, Jiao Juying, et al. Spatiotemporal evolution characteristics of extreme precipitation events on the Loess Plateau from 1960 to 2023 [J]. Arid Land Geography, 2025,48(7):1153-1166.

[24] Adeyeye O A, Hassaan A M, Yonas M W, et al. Integrating partial least square structural equation modelling and machine learning for causal exploration of environmental phenomena [J]. Environmental Research, 2025, 274:121358.

[25] Ji Fang, Yuan Shanshui, Fan Linfeng, et al. Thresholds in land-atmosphere interactions on the Qinghai-Tibet Plateau: Impacts of permafrost degradation *via* vegetation changes [J]. Journal of Hydrology, 2025, 662:133912.

[26] Jiang Jie, Qin Yaochen, Liu Gangjun, et al. Fluctuations of the 400 mm precipitation line under the influence of multiple factors [J]. Global and Planetary Change, 2026,256:105179.

[27] Shi Siqi, Yang Peiqi, Vrieling A, et al. Vegetation optimal temperature modulates global vegetation season onset shifts in response to warming climate [J]. Communications Earth & Environment, 2025,6:203.

[28] Ren Qiang, He Chunyang, Huang Qingxu, et al. Impacts of urban expansion on natural habitats in global drylands [J]. Nature Sustainability, 2022, 5(10): 869-878.

[29] Kong Weilong, Shen Wencang, Yu Chaoyue, et al. The neglected cost: Ecosystem services loss due to urban expansion in China from a triple-coupling perspective [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2025,112:107827.

[30] Chen Hao, Zhang Xiaoping, Abla M, et al. Effects of vegetation and rainfall types on surface runoff and soil erosion on steep slopes on the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2018,170:141-149.

[31] 陶勤,王世航,王奇,等.基于InVEST模型的川滇生态屏障区土壤保持功能评价[J].土壤学报,2024,61(6):1548-1556.
Tao Qin, Wang Shihang, Wang Qi, et al. Evaluation of soil conservation function in the Sichuan-Yunnan ecological barrier area based on the InVEST model [J]. Acta Pedologica Sinica, 2024,61(6):1548-1556.

(下转第363页)