

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.06.038

CSTR:32310.14.stbxb.2025.06.038

杨佳, 斛如媛, 赵海平, 等. 基于XGBoost-SHAP的三峡库区生态屏障区生态系统服务权衡及驱动力分析[J]. 水土保持学报, 2025, 39(6): 127-138.

YANG Jia, HU Ruyuan, ZHAO Haiping, et al. Analysis of trade-offs and driving forces of ecosystem services in ecological barrier zone of three gorges reservoir area based on XGBoost-SHAP model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(6):127-138.

## 基于XGBoost-SHAP的三峡库区生态屏障区 生态系统服务权衡及驱动力分析

杨佳<sup>1,2,3</sup>, 斛如媛<sup>1,2</sup>, 赵海平<sup>1,2</sup>, 勾蒙蒙<sup>1,2</sup>, 欧阳帅<sup>3</sup>, 刘常富<sup>1,2</sup>, 肖文发<sup>1,2</sup>

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所, 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091; 2. 湖北秭归三峡库区森林生态系统定位观测研究站, 湖北 秭归 443600;  
3. 中南林业科技大学生态环境学院, 长沙 410004)

**摘要:** [目的] 探究三峡库区生态屏障区生态系统服务权衡及其驱动因素, 为区域生态系统综合管理和生态安全保障提供科学依据。 [方法] 基于三峡库区生态屏障区2000—2023年土地利用/覆被数据、气象数据、土壤数据等地理多源数据, 运用CASA、RUSLE和InVEST等模型系统评估产水服务、碳固存、土壤保持、生境维持和水质净化5种典型生态系统服务, 探讨各生态系统服务间权衡与协同关系, 并进一步利用XGBoost-SHAP模型揭示生态系统服务权衡关键驱动因子。 [结果] 1) 产水服务、碳固存和土壤保持服务在2000—2023年呈先下降后增加的趋势, 而生境质量、水质净化则呈下降趋势; 在空间上, 产水服务、生境维持、土壤保持、水质净化高值区主要分布在中部、东部, 碳固存则表现为由中部向东西两侧递减。 2) 5种生态系统服务之间整体以协同关系为主, 协同区主要分布在生态屏障区中部及海拔较高、植被覆盖度高的区域, 而权衡区主要分布在河流两岸区域、西部的重庆城市区及东部邻近宜昌城区的区域。 3) 降水增长率、坡度、海拔及植被盖度是决定生态系统服务权衡关系的主要驱动因子, 其影响存在阈值效应, 而人口密度在一定程度上加剧生态系统服务之间的权衡关系。 [结论] 在今后生态屏障区的生态修复工程中, 应更加关注自然和人为驱动对权衡关系的非线性影响和阈值效应, 以更加精准地实现生态系统服务的多功能提升。

**关键词:** 生态系统服务; 权衡与协同; XGBoost-SHAP模型; 驱动因素; 三峡库区生态屏障区

**中图分类号:** S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2025)06-0127-12

## Analysis of Trade-offs and Driving Forces of Ecosystem Services in Ecological Barrier Zone of Three Gorges Reservoir Area Based on XGBoost-SHAP Model

YANG Jia<sup>1,2,3</sup>, HU Ruyuan<sup>1,2</sup>, ZHAO Haiping<sup>1,2</sup>, GOU Mengmeng<sup>1,2</sup>,  
OUYANG Shuai<sup>3</sup>, LIU Changfu<sup>1,2</sup>, XIAO Wenfa<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of National Forestry and Grassland Administration, Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Hubei Zigui Three Gorges Reservoir Forest Ecosystem Observation and Research Station, Zigui, Hubei 443600, China; 3. College of Ecology and Environment, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to investigate the trade-offs among ecosystem services and their driving factors in the ecological barrier zone of the Three Gorges Reservoir area, thereby providing a scientific basis for integrated ecosystem management and ecological security in the region. [Methods] Based on multi-source geographic data including land use/cover data, meteorological data, and soil data in the ecological barrier zone of the Three Gorges Reservoir area from 2000 to 2023, the CASA, RUSLE, and InVEST models were employed

收稿日期: 2025-07-02 修回日期: 2025-08-04 录用日期: 2025-08-15 网络首发日期(www.cnki.net): 2025-09-29

资助项目: 国家重点研发计划项目(2023YFF1305205)

第一作者: 杨佳(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事生态系统服务研究。E-mail: yangjia\_2049@163.com

通信作者: 勾蒙蒙(1991—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事生态系统服务与水土保持研究。E-mail: goumm0243@126.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

to systematically evaluate five typical ecosystem services: Water yield, carbon sequestration, soil conservation, habitat maintenance, and water purification. The trade-offs and synergies among these ecosystem services were examined, and the XGBoost-SHAP model was further utilized to identify the key driving factors of trade-offs among ecosystem services. [Results] 1) Water yield, carbon sequestration, and soil conservation showed an initial decrease followed by an increasing trend from 2000 to 2023, while habitat quality and water purification showed a declining trend. Spatially, the high-value areas for water yield, habitat maintenance, soil conservation, and water purification were mainly distributed in the central and eastern regions, while carbon sequestration exhibited a decreasing trend from the central regions towards the eastern and western regions. 2) Overall, synergistic relationships dominated among the five ecosystem services, and the synergistic regions were primarily distributed in the central part of the ecological barrier zone and regions with higher altitudes and greater vegetation cover. In contrast, the trade-off effects were mainly observed along banks of the river, as well as in the urban area of Chongqing to the west and the region adjacent to the urban area of Yichang to the east. 3) Precipitation growth rate, slope, altitude, and vegetation cover were the main driving factors determining trade-offs among ecosystem services, and their impacts exhibited certain threshold effect. Population density was found to exacerbate trade-offs among ecosystem services to some extent. [Conclusion] Future ecological restoration projects in the ecological barrier zone should place greater emphasis on the non-linear impacts and threshold effects of natural and anthropogenic-driven factors on trade-offs, so as to achieve a more precise multifunctional enhancement of ecosystem services.

**Keywords:** ecosystem services; trade-offs and synergies; XGBoost-SHAP model; driving factors; ecological barrier zone of Three Gorges Reservoir area

Received: 2025-07-02

Revised: 2025-08-04

Accepted: 2025-08-15

Online(www.cnki.net): 2025-09-29

生态系统服务(ecosystem services, ESs)是指人类从自然环境中直接或间接获得的各种惠益,作为社会-生态系统连接桥梁,对于维持区域可持续发展具有重要意义<sup>[1]</sup>。生态系统服务的相互关系往往受到外部和内部作用的共同影响,表现为此消彼长的权衡和共同增益的协同关系<sup>[2]</sup>。黄土高原的研究<sup>[3]</sup>结果表明,大尺度景观植被恢复增加水土保持、生境质量、果实产量等服务,降低木材产量和产水量。海河流域开展的三北防护林和京津风沙源治理工程等有效提高防风固沙服务,但减弱水资源供给服务<sup>[4]</sup>。因此,科学认知生态系统服务权衡关系及其驱动因素是生态系统服务研究的关键挑战之一,也是开展可持续生态系统管理的前提和基础<sup>[5]</sup>。

随着生态系统服务研究的不断深入,面向生态系统综合管理与定向调控的生态系统服务权衡研究逐渐转向权衡背后的驱动因素分析<sup>[6]</sup>。在探究生态系统服务影响因素方面,常用的方法包括相关分析<sup>[7]</sup>、多元线性回归<sup>[8]</sup>、地理探测器模型<sup>[9]</sup>和地理加权回归模型<sup>[10]</sup>等,但上述传统的方法在处理高维、共线性及非线性等方面仍存在较大的不确定性<sup>[11]</sup>。随机森林、人工神经网络、支持向量机、极端梯度提升等机器学习技术快速发展为生态系统服务权衡因素分析提供新的视角和方法。刘颂等<sup>[12]</sup>采用随机森林模型探索该

区域生态系统服务权衡协同形成的关键驱动因素及其非线性影响效应,表明土地利用强度是管理生态系统服务权衡向协同转化的主导因素;曾凯豪等<sup>[13]</sup>通过贝叶斯网络模型分析土地利用功能权衡协同关系及其驱动因子发现,人类活动强度等是影响当地土地利用功能差异化发展的关键驱动因子。虽然上述方法在一定程度上有助于理解生态系统服务权衡机制,但这些方法在处理非线性关系及量化变量贡献时存在局限,尤其对生态系统要素间的非线性互馈作用缺乏系统性表征。XGBoost在分析高维度、大规模数据及处理复杂非线性关系等方面具备优异的性能,在众多领域得到了广泛应用<sup>[14]</sup>。通常情况下,机器学习模型往往被视作为“黑箱”模型,其内部机制和各特征对预测结果的具体贡献具有不透明性<sup>[15]</sup>。SHAP(SHapley Additive exPlanations)模型可通过量化特征对模型输出的贡献,不仅可以衡量驱动因素的贡献大小,还能识别驱动因素的影响方向及交互效应<sup>[16]</sup>。因此,将XGBoost与SHAP模型结合不仅能够精准量化驱动因素对生态系统服务权衡关系的复杂影响,还能够量化不同驱动因素对生态系统服务权衡的具体贡献,能够为生态系统服务的综合调控与管理提供新的工具,但目前该方法应用于生态系统服务权衡驱动方面仍有待进一步探索。

三峡库区生态屏障区指的是《三峡后续工作规划》<sup>[17]</sup>中土地淹没线至第1道山脊线之间的区域,该区域既是保障区域生态安全的核心区域,也是三峡库区内生态敏感脆弱、人为干扰大、人地矛盾突出的典型区域,尤其是三峡水利枢纽工程建设等驱动区域生态环境发生快速变化,产生面源污染、水土流失、生态退化及景观破碎化等问题<sup>[17-18]</sup>。20世纪80年代以来,国家已在生态屏障区开展长防林、退耕还林、石漠化治理等一系列生态保护修复工程,显著提升区域森林覆盖率,有效缓解生态退化形势,但该区域生态系统服务权衡特征及其驱动因素仍不清晰。基于此,本文通过定量评估碳固存、土壤保持、产水服务、生境维持、水质净化5种生态系统服务,深入分析和探讨生态系统服务权衡关系,综合运用XGBoost-SHAP模型解析生态系统服务权衡关系驱动因素,旨在为三峡屏障生态系统综合管理和区域可持续发展提供理论基础和决策支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

三峡库区生态屏障区(29°20′~31°60′N,106°05′~111°10′E,)位于三峡水库土地淹没线(坝前正常蓄水位175 m接五年一遇洪水和11月五年一遇来水回水水面线)至第一道山脊线之间,涉及位于三峡库区的湖北省和重庆市的19个区县及重庆主城区<sup>[19]</sup>。生态屏障区总面积为5 527.55 km<sup>2</sup>,其中城镇面积536.73 km<sup>2</sup>,农村面积4 990.82 km<sup>2</sup>。生态屏障区地貌以中低山、丘陵为主,海拔35~2 999 m。生态屏障区属典型的亚热带湿润季风气候,四季分明,雨量适中,温暖湿润,年平均气温14.31~17.33℃,年降水量992.51~1 347.59 mm。区域内主要土壤类型为黄壤、山地黄棕壤、紫色土、石灰土等。

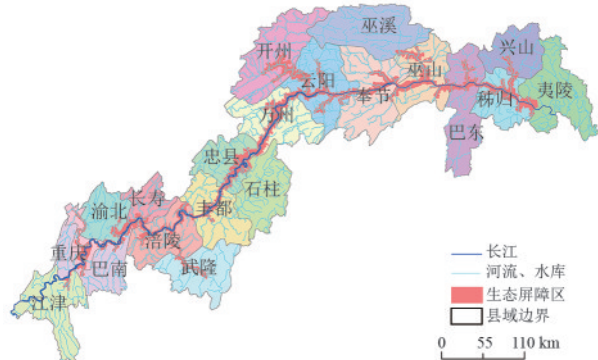


图1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of the study area

### 1.2 数据来源与处理

1) 土地利用数据(2000年、2005年、2010年、

2015年、2020年、2023年),空间分辨率为30 m,该数据以Landsat-OLI/ETM、Sentinel-1、Sentinel-2等遥感数据为基础,依据全国遥感监测土地利用/覆盖分类体系,结合随机森林分类和人工目视解译获得,总体精度均>90%,Kappa系数>0.94。

2) 气象数据主要包括降水、温度、太阳辐射、日照时间等,来源于国家气象信息中心(<https://data.cma.cn>),各年份气象数据均通过普通克里金插值方法插值为空间分辨率为30 m的栅格数据。

3) 数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/>),空间分辨率为30 m。

4) 土壤类型、质地、各粒径比例、有机质含量等数据来源于1:100万中国土壤数据库。

5) 遥感数据包括核标准化植被指数(kernel normalized difference vegetation index, kNDVI)、人口密度、夜间灯光指数数据等。kNDVI直接采用MOD13Q1产品,空间分辨率为250 m。人口密度来源于Land Scan人口密度数据集(<https://landscan.ornl.gov/>),空间分辨率为1 km;夜间灯光指数来源于国家地球系统科学数据中心(<https://www.geodata.cn/aboutus.html>),空间分辨率为500 m。

### 1.3 生态系统服务功能量化

基于生态屏障区特殊的区位、生态定位及其面临的核心人地矛盾问题,本文聚焦选取碳固存、土壤保持、产水服务、生境维持、水质净化这5种关键生态系统服务。它们分别对应生态系统的固碳功能通过减缓温室气体排放,响应气候变化、高强度土地开发加剧的土壤流失、日益增长的水资源需求胁迫、生物多样性急剧下降及耕地和柑橘经济林扩张导致的面源污染加剧等严峻生态问题。

1.3.1 碳固存 采用净初级生产力(net primary productivity, NPP)作为评估碳固存的定量指标,通过CASA模型计算NPP<sup>[20]</sup>,计算公式为:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \epsilon(x, t) \quad (1)$$

式中: NPP(x, t)为净初级生产力, g/m<sup>2</sup>(以C计); APAR(x, t)为光合有效辐射, MJ/m<sup>2</sup>;  $\epsilon(x, t)$ 为实际光能利用率, g/MJ(以C计)。

1.3.2 土壤保持 土壤保持使用修订的通用土壤流失方程(revised universal soil loss equation, RUSLE),通过潜在土壤流失量与实际土壤流失量的差值进行表征<sup>[21]</sup>,计算公式为:

$$SR = R \times K \times LS \times (1 - C \times P) \quad (2)$$

式中: SR为土壤保持量, t/hm<sup>2</sup>; R为降雨侵蚀力因子, (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h); K为土壤可蚀性因子,

$(t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}) / (\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$ ;  $LS$  为坡长坡度因子;  $C$  为植被覆盖因子;  $P$  为水土保持措施因子。

1.3.3 产水服务 基于 InVEST 模型的产水量模块, 通过计算降雨量与实际蒸散量的差值来量化产水服务, 计算公式<sup>[22]</sup>为:

$$\text{WY}_x = \left( 1 - \frac{\text{AET}_x}{P_x} \right) \times P_x \quad (3)$$

$$\frac{\text{AET}_x}{P_x} = 1 + \frac{\text{PET}_x}{P_x} - \left[ 1 + \left( \frac{\text{PET}_x}{P_x} \right)^\omega \right]^{1/\omega} \quad (4)$$

式中:  $\text{WY}_x$  为年产水量, mm;  $\text{AET}_x$  为年实际蒸散量, mm;  $P_x$  为年降水量, mm;  $\text{PET}_x$  为年潜在蒸发量, mm;  $\omega$  为无量纲的参数。

1.3.4 生境维持 采用 InVEST 模型的生境质量模块, 通过整合土地利用类型对威胁因素的敏感性和威胁因素的强度对生境维持进行评估, 计算公式<sup>[23]</sup>为:

$$\text{HQ}_{xj} = H_j \times \left( 1 - \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z - K^z} \right) \quad (5)$$

式中:  $\text{HQ}_{xj}$  为土地利用类型  $j$  中栅格  $x$  的生境质量;  $H_j$  为土地利用类型  $j$  的生境适宜度, 取值  $0 \sim 1$ ;  $D_{xj}^z$  为土地利用类型  $j$  中栅格  $x$  的生境退化度指数;  $K$  为半饱和常数, 一般为生境退化度最大值的  $1/2$ ;  $z$  为归一化常量, 通常设置为  $2.5$ <sup>[24]</sup>。

1.3.5 水质净化 InVEST 模型中的水质净化模块 (nutrient delivery ratio, NDR), 通过定量评估陆地生态系统对氮 (N)、磷 (P) 等营养盐的截留与净化能力, 从而反映不同土地利用覆盖下水质净化服务。在本文中通过量化总磷输出量来测算区域水质净化能力。其中, 总磷输出量越高, 水质净化能力越低。计算公式<sup>[25]</sup>为:

$$\text{ALV}_x = \text{HHS}_x \times \text{pol}_x$$

式中:  $\text{ALV}_x$  为栅格调整后的输出量;  $\text{HHS}_x$  为栅格  $x$  的水文敏感性得分;  $\text{pol}_x$  为栅格  $x$  的输出系数。根据不同的土地利用覆盖类型对污染物的拦截效率测量最后到达水体的 TP 输出总量。

## 1.4 数据分析

1.4.1 生态系统服务权衡计算 采用皮尔逊相关系数法对生态系统服务间权衡关系进行量化, 若相关系数为正值表明两种生态系统服务间存在同时增加或减少的协同关系, 若相关系数为负值则表明 2 种生态系统服务间呈权衡关系。利用双尾显著性检验的方法, 将生态系统服务间的权衡/协同关系划分为以下 6 类: 显著协同 ( $r > 0, p \leq 0.01$ )、较显著协同 ( $r > 0, 0.01 < p \leq 0.05$ )、协同 ( $r > 0, p > 0.05$ )、显著权衡 ( $r < 0, p \leq 0.01$ )、较显著权衡 ( $r < 0, 0.01 < p \leq 0.05$ )、权衡 ( $r < 0, p > 0.05$ )<sup>[26]</sup>。

1.4.2 生态系统服务权衡驱动因素分析 以研究区域内分辨率为  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$  的渔网数据为基础, 结合现有研究和三峡库区生态屏障区自然、社会特点<sup>[27-28]</sup>, 选取温度和降水增长率、海拔、坡度、核标准化植被指数 (kNDVI)、耕地面积占比、建设用地占比、林地面积占比、人口密度和夜间灯光指数分析生态系统服务权衡的驱动因素。其中温度和降水增长率通过叠加 2000—2023 年数据计算而来的 slope 斜率, 以百分比的形式呈现<sup>[29]</sup>。XGBoost 是一种基于决策树的分布式梯度提升框架, 相较于传统梯度提升算法具备加权处理数据分布、正则化防止过拟合、支持并行计算加速训练, 并能自动处理缺失值等优势, 被广泛应用于处理大规模、高维数据的分类与回归中<sup>[30]</sup>。因此, 本文使用 XGBoost 模型分析驱动因素对生态系统服务权衡的影响。为进一步解释 XGBoost 回归模型, 本文采用 LUNDBERG 等<sup>[31]</sup>提出的 SHAP 方法识别驱动因素对生态系统服务权衡影响的重要性。采用十折交叉验证, 通过计算决定系数 ( $R^2$ )、均方根误差 (RMSE) 评估模型的综合性能。

## 2 结果与分析

### 2.1 生态系统服务功能时空演变特征

2000—2023 年三峡库区生态屏障区产水服务、生境维持、碳固存和土壤保持整体变化趋势见图 2。由图 2 可知, 2000—2010 年, 产水服务、碳固存和土壤保持均持续下降, 分别降低 12.17%、7.25% 和 27.18%; 2010—2023 年, 这 3 项服务则呈波动上升趋势, 分别上升 24.60%、31.84% 和 66.79%。而生境维持在 2000—2005 年呈上升趋势, 而在 2005 年后则呈持续下降趋势, 降幅为 18.88%。水质净化服务价值的高低与氮和磷的输出呈负相关, 即氮和磷的输出越少, 表明此区域水质净化服务价值越高。2000—2010 年水质净化能力显著下降, 2010—2023 年虽呈波动回升, 但总体仍低于 2000 年水平。从空间分布来看, 生态屏障区生态系统服务呈明显的空间异质性 (图 3)。产水量、土壤保持、生境维持和水质净化高值区主要集中在中部及东部, 该区域位于中高海拔区域人为干扰较少、植被覆盖较高, 因此具有较强的产水量、土壤保持、生境维持、水质净化能力; 而低值区主要位于中、西部人口密集区域, 水质净化低值区与耕地空间分布具有高度一致性。碳固存整体呈现由中部向两端递减的空间格局。高值区主要分布在中部区域, 低值区主要分布在河流沿岸及靠近重庆、宜昌市区区域, 这些区域主要分布着耕地、园地和建设用地, 人类干扰强度大、植被覆盖率低, 加之受库

区蓄水的影响,碳固存能力较低。相较于2000年,2023年生态屏障区产水量、碳固存、土壤保持能力中部、东部明显增加,由中值区、较高值区变为高值区。

而生境维持与水质净化表现为整体降低,特别是屏障区边缘由2000年的高值区转为中值区和较高值区,西部低值区和较低值区面积增大。

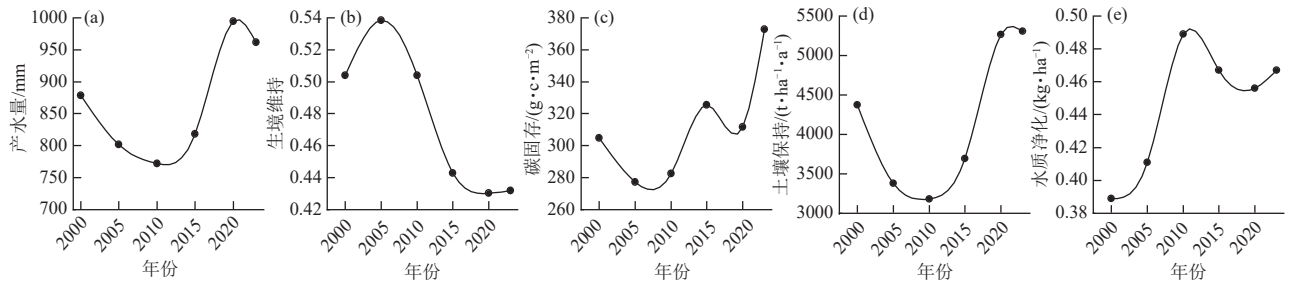


图 2 生态屏障区生态系统服务功能时间变化趋势

Fig. 2 Temporal trends of ecosystem service functions in ecological barrier zone

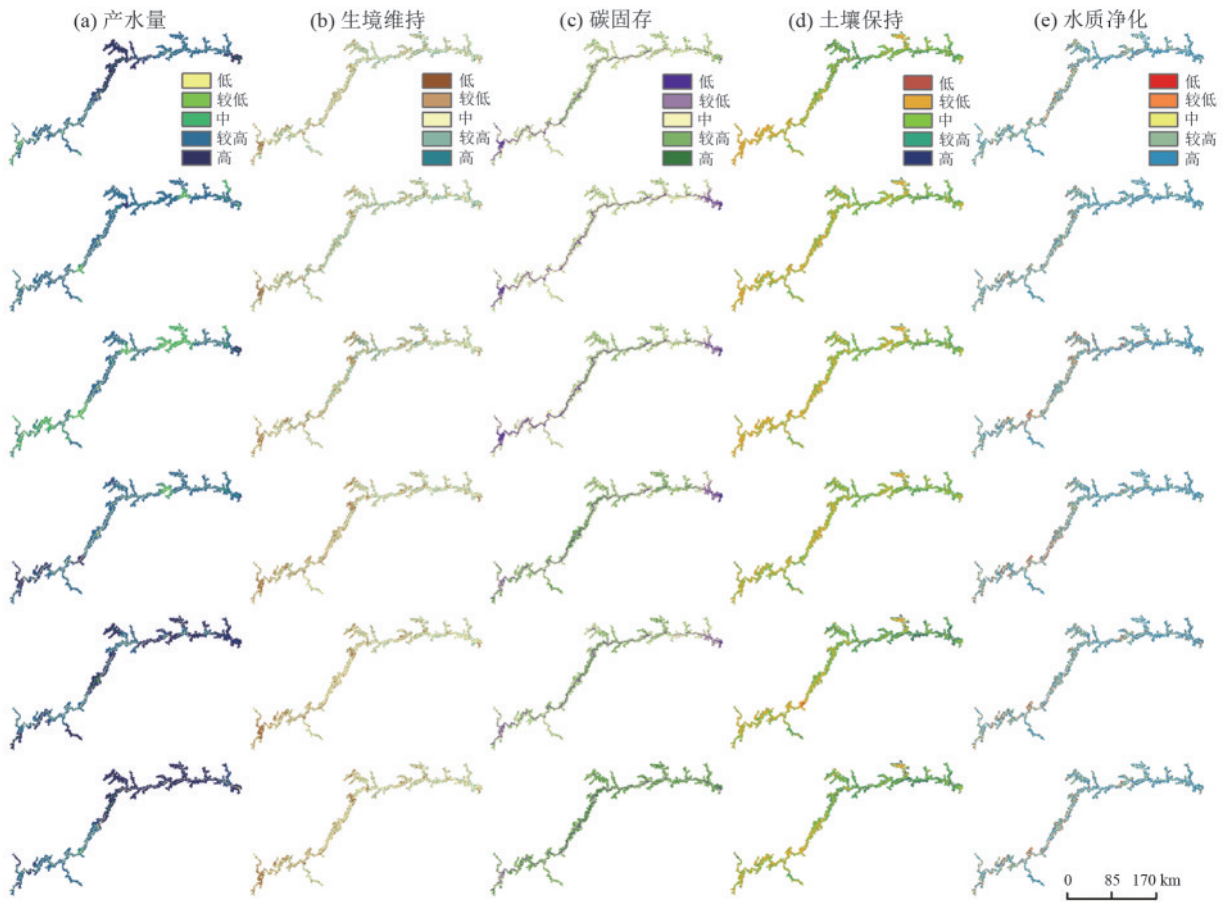


图 3 生态系统服务空间分布格局

Fig. 3 Spatial distribution patterns of ecosystem services

2.2 生态系统服务功能权衡关系

三峡库区生态屏障区5项关键生态系统服务间呈现协同主导、空间分异显著的特征(图4)。其中,产水量-碳固存、产水量-生境维持、产水量-土壤保持的空间分布存在高度相似性,受水分梯度、植被覆盖及人类活动强度的共同调控的影响,形成明显的“五段式”格局。从东向西依次为权衡-协同-显著协同-协同-权衡的空间分布模式,其显著协同面积占比分别为5.94%、6.05%和4.40%

( $p < 0.05$ )。生境维持-碳固存空间分布格局中,显著协同区主要聚集在库区边缘,主要是因为该区域位于较高海拔地带、植被类型以森林为主,生态环境受到的扰动小,因此具有显著的协同效应,显著协同面积占比为11.01%;生境维持-土壤保持、碳固存-土壤保持显著协同区主要集中在研究区中部及中西部,显著协同区面积占比分别为9.28%和12.36%。受人类活动剧烈、植被覆盖率较低的影响,以上6组关系中的显著权衡区( $p < 0.05$ )都

主要集中分布于河流两岸区域及西部的重庆城市区以及东部邻近宜昌城区的区域。其次水质净化-碳固存/生境维持/土壤保持/产水量均呈现出显著协同关系,但整体空间分布较为零散,显著协同斑块呈“星散-镶嵌”状散布,其显著协同区 ( $p < 0.05$ ) 主要出现在库首-库腹的常绿林带,面积

占比分别为 11.73%、12.11%、9.46% 和 12.04%,主要得益于较高的森林覆盖对磷污染物的吸附及对水源、土壤的保持功能。显著权衡区集中出现在库腹低山丘陵区,面积占比分别为 2.64%、7.44%、2.63% 和 3.15%,其主要受耕地、柑橘经济林扩张与村镇建设用地扩张的影响。

表 1 不同生态系统服务权衡/协同面积占比

Table 1 Area proportion of trade-offs and synergies among different ecosystem services

指标	权衡	较显著权衡	显著权衡	显著协同	较显著协同	协同
产水量-碳固存	45.51	1.27	0.89	2.52	3.42	46.39
产水量-生境维持	44.82	1.90	0.73	2.87	3.14	46.54
产水量-土壤保持	46.12	1.25	0.61	1.78	2.62	47.62
生境维持-碳固存	42.26	0.41	0.89	6.28	4.73	45.43
生境维持-土壤保持	42.67	0.71	0.81	4.79	4.49	46.53
碳固存-土壤保持	41.34	0.69	0.53	7.17	5.19	45.08
水质净化-生境维持	33.34	4.43	3.01	7.52	5.59	46.11
水质净化-产水量	47.91	1.74	1.41	7.39	4.65	36.90
水质净化-碳固存	32.95	1.32	1.32	6.70	5.03	52.68
水质净化-土壤保持	40.82	1.23	1.40	5.26	4.20	47.09

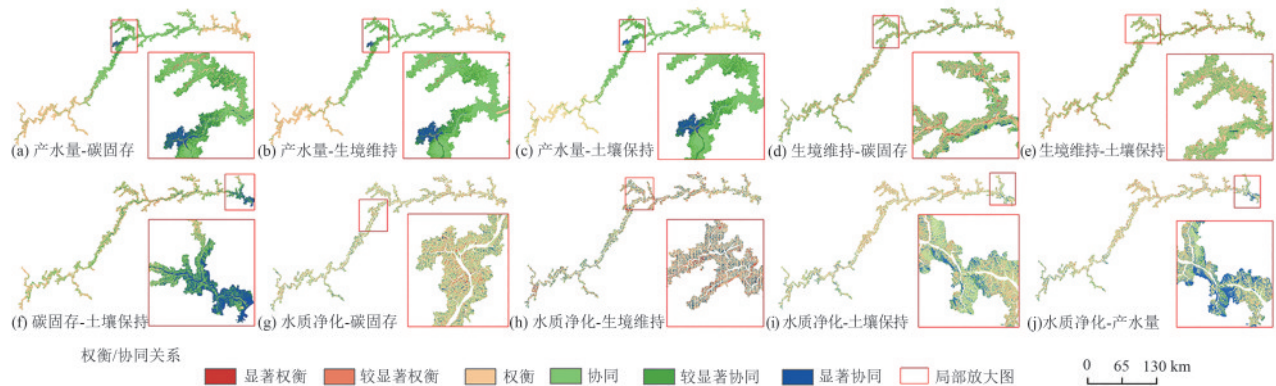


图 4 生态屏障区生态系统服务权衡/协同关系空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of trade-offs/synergies of ecosystem services in ecological barrier zone

2.3 驱动因素分析

表 2 为使用 XGBoost 模型对不同生态系统服务权衡与协同关系进行建模的结果,决定系数 ( $R^2$ ) 平值为 0.56~0.76,表明模型在测试集上都有较好的拟合度,符合模型假设条件,表明 XGBoost 模型对研究数据具有较好的适用性。

表 2 XGBoost 模型测试集模型精度检验

Table 2 Accuracy test of regression model of XGBoost

变量	$R^2$	RMSE
碳固存-土壤保持	0.76	0.56
生境维持-碳固存	0.74	0.58
生境维持-土壤保持	0.74	0.59
产水量-碳固存	0.76	0.58
产水量-生境维持	0.75	0.57
产水量-土壤保持	0.75	0.57
水质净化-碳固存	0.63	0.65
水质净化-生境维持	0.56	0.78
水质净化-土壤保持	0.61	0.68
水质净化-产水量	0.58	0.73

基于 XGBoost-SHAP 模型分析,三峡库区生态屏障区生态系统服务权衡与协同关系的驱动机制呈现“自然主控、人类弱效”的鲜明特征(图 6)。降水增长率、坡度、海拔及 kNDVI 是驱动生态屏障区 10 组生态系统服务权衡与协同关系的关键因子。其中,降水增长率相对贡献量最为突出,在产水量相关服务对(产水量-碳固存/生境维持/土壤保持/水质净化)及水质净化-土壤保持中占据主导地位 (SHAP 为 0.45~0.75),且在除生境维持-碳固存、水质净化-碳固存外的组合中 SHAP 均  $> 0.35$ 。坡度是生境维持、水质净化相关服务对的关键影响因子,在生境维持-碳固存/土壤保持/产水量、水质净化-生境维持/土壤保持/产水量 6 组关系中均位居相对贡献量的前 3 位。kNDVI 与海拔通过调控地表生态过程,显著驱动碳固存等相关服务对,如碳固存-产水量/土壤保持/生境维持/水质净化及产水量-水质净化的服务关系。在表征人类活动因子

中,人口密度是较为重要的影响因子,SHAP 为 0.1~0.4,主要对生境维持-碳固存/土壤保持、产水量-土壤保持、水质净化-碳固存/生境质量关系产生重要影响,其中对水质净化-碳固存影响最大,因子

排序位列第 1,且 SHAP>0.35。相比之下,夜间灯光指数与建设用地占比的影响较小,SHAP,均低于 0.1,对生态系统服务权衡与协同关系的整体影响较为微弱。

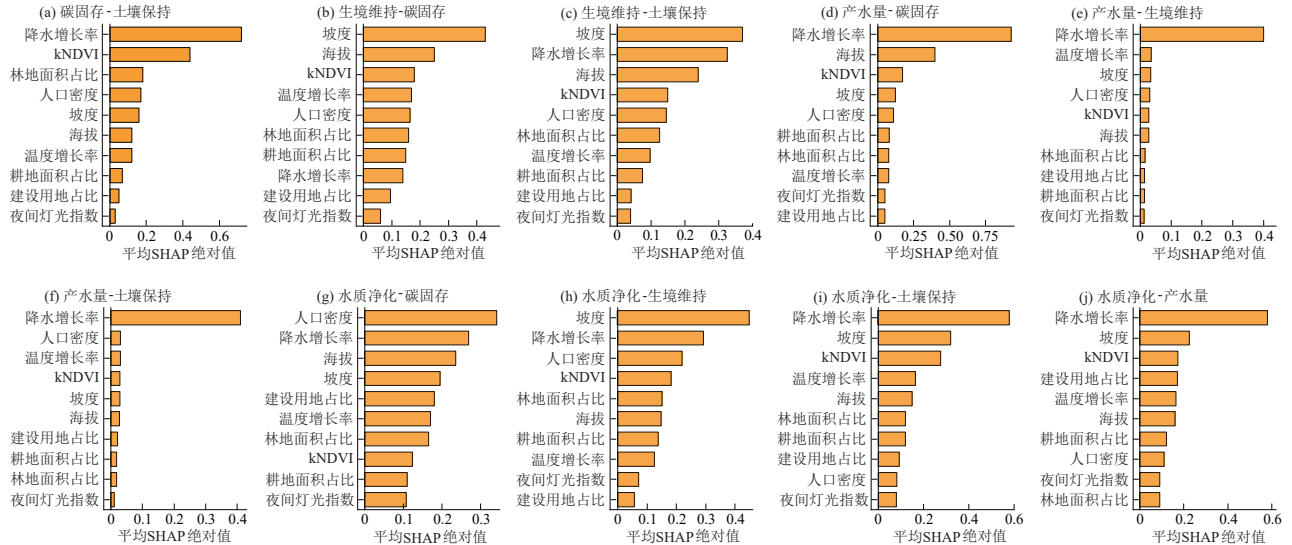


图 6 生态屏障区权衡与协同关系的 SHAP 特征

Fig. 6 SHAP features of trade-offs and synergies in ecological barrier zone

基于 SHAP 值的偏依赖分析对各服务关系中贡献量前 3 的影响因子进行可视化,进一步揭示对生态系统服务权衡与协同关系变化的非线性特征及阈值效应(图 7)。本研究表明,降水增长率是服务关系的关键阈值约束因子,当其在 0~4.1% 时,能显著增强涉及产水量、土壤保持、水质净化的服务间关系的协同效应;超出该范围则协同效应减弱而权衡效应增强。坡度是影响涉及生境维持、水质净化的服务间关系的关键因子,1.4°~23.0°坡度可强化生境维持-碳固存、生境维持-土壤保持、产水量-生境维持、水质净化-土壤保持的协同效应,但在水质净化-生境维持、水质净化-产水量中,只有当坡度>21.9°和>38.0°时促进协同关系。海拔(411~1 045 m)与植被因子(林地面积占比>19%或 kNDVI>0.4)共同促进涉及碳固存相关的服务关系,随着海拔升高与植被因子增大,碳固存-土壤保持/生境维持/产水量/水质净化之间的协同效应增强。温度增长率在产水量-生境维持、产水量-土壤保持关系中表现出显著的阈值效应,超出-0.001%~0.033% 阈值范围将导致权衡效应增强。人口密度(203~558 人/km<sup>2</sup>)对产水量-土壤保持、水质净化-碳固存/生境维持呈正向驱动(SHAP>0),但散点密度分析显示,当单位面积人口数量不超过 500 人时,人口密度对生态系统服务关系的正向化效果最为显著。

### 3 讨论

生态屏障区海拔由中部向两端递减,林地主要

分布在中部和中东部海拔较高的区域,而农田、建设与用地主要分布在河流两岸及西部人口密集区域,因此,碳固存、土壤保持、产水量、生境维持、水质净化高值区主要分布在中部和中东部。此外,生态屏障区产水量、碳固存、土壤保持整体呈先下降后上升的变化趋势,与周瑞娇等<sup>[32]</sup>、勾蒙蒙等<sup>[33]</sup>在三峡库区研究一致,但生态屏障区生境维持、水质净化呈持续下降趋势,与孟浩斌等<sup>[34]</sup>在研究中提出三峡库区生境维持保持基本不变及刘明宇等<sup>[35]</sup>提出的三峡库区水质净化能力先增加后降低的结论不符,其主要因为生态屏障区内具有相对强烈的人为干扰,同时高肥投入的柑橘园等经济林面积不断增加,也是造成面源污染的关键原因。因此屏障区生境维持与水质净化呈现出持续下降的趋势。一般而言,受植被覆盖与人类活动竞争的影响供给服务与调节服务常呈现出权衡关系<sup>[36-37]</sup>。本研究发现在屏障区中部及东部区域的产水量-碳固存/土壤保持/生境维持/水质净化之间均以协同关系为主导,与喇露梦等<sup>[38]</sup>在三峡库区研究中碳固存-产水量、土壤保持-产水量呈权衡关系结论不同,反映生态系统服务关系的空间异质性和尺度依赖性,不同研究尺度(如局部、区域、流域等)可能会揭示生态系统服务之间不同的权衡或协同关系。因此,在研究生态系统服务研究时,必须考虑空间和尺度因素,在进行生态保护和资源管理时需要采取更加精细化和差异化的策略。

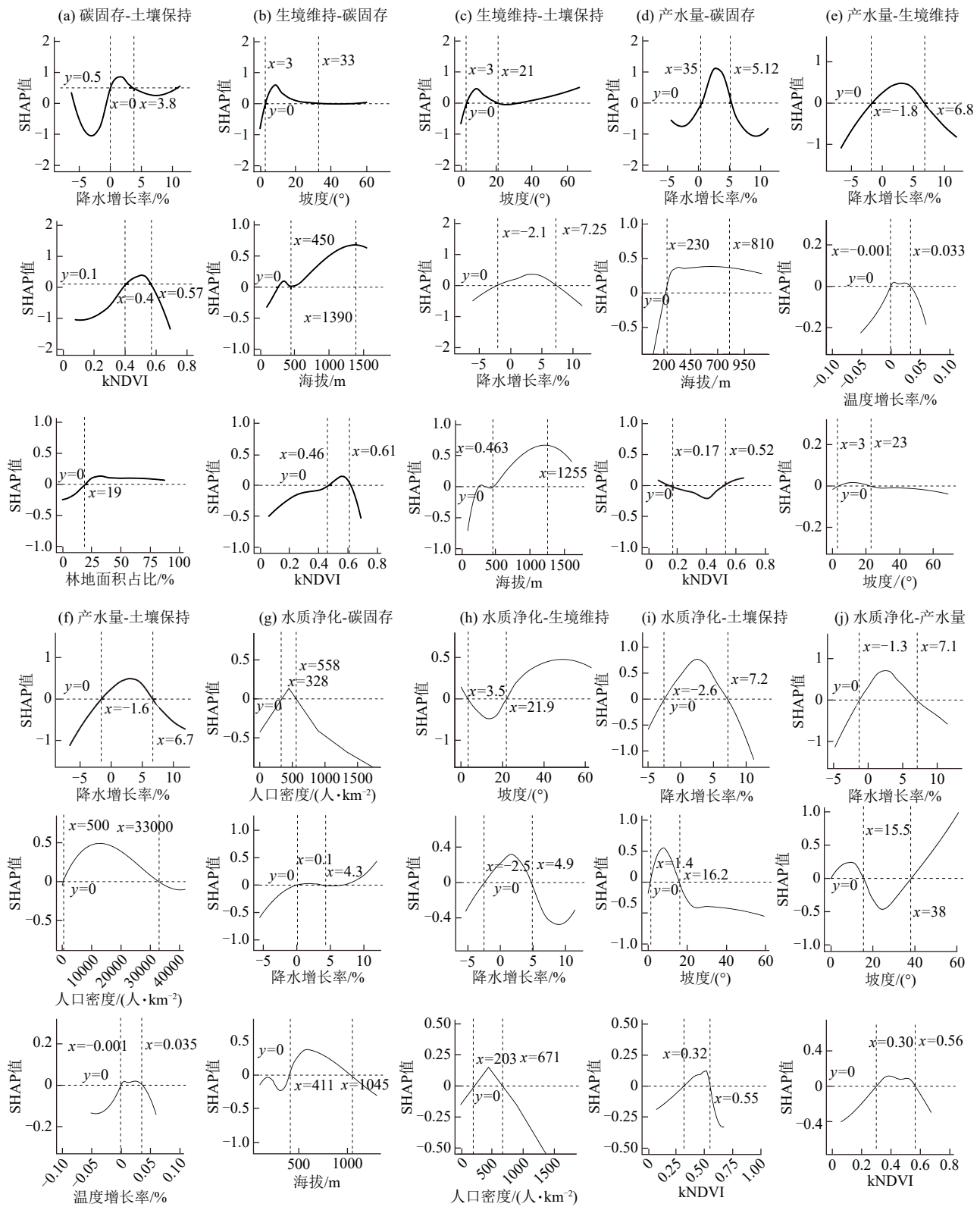


图 7 基于 SHAP 依赖图的生态模型影响因素分析

Fig. 7 Analysis of influencing factors in ecological model based on SHAP dependence plots

生态系统服务之间的复杂交互关系受到自然因素和人类活动的显著影响。本文采用 XGBoost-SHAP 模型,探究不同因素对生态系统服务权衡与协同关系的非线性影响及阈值效应,有助于深入地理解生态系统服务关系的变化机制。综合结果表明,降水

增长率对生态系统服务权衡与协同关系的变化具有主导性作用,并且存在明显的阈值效应,其影响范围为 0~4.1%。主要是由于降水是水文循环的关键组成部分,对生态系统中的水分供应和分配有着直接的影响<sup>[39]</sup>。降水增长率的变化可能影响植被的生长

和分布,进而影响碳固存和土壤保持等生态系统服务<sup>[40]</sup>。植被覆盖(林地面积占比 $\geq 19\%$ , $kNDVI > 0.4$ )则存在明确的生态功能阈值,超越此阈值森林生态系统能显著增强固碳、保土和维持生境的能力,形成正向反馈循环<sup>[41]</sup>。但研究中也揭示出过高的植被指数也造成权衡效应,因此,长期以增加植被覆盖度为主要目标的生态保护修复工程可能导致生态系统服务权衡加强,强调生态保护修复过程中的协调理念<sup>[5]</sup>。地形(坡度 $1.4^\circ \sim 23.0^\circ$ ,海拔 $411 \sim 1\,045\text{ m}$ )对“生境维持-碳固存-土壤保持”具有显著的协同增强效应,原因在于该地形范围内植被类型以林地为主,有较高的碳固存和土壤保持能力,加之较少的人类活动干扰,共同促进生态环境质量的提升<sup>[42]</sup>。而在水质净化-生境维持/产水量服务关系中,只有当坡度在 $> 38^\circ$ 时促进协同关系,最主要原因在于当坡度较缓时,水流速度低,地表径流量小,污染物(如氮磷)主要依赖垂直入渗和植物吸收,此时水质净化-生境维持/产水量之间往往呈权衡关系<sup>[43]</sup>,随着坡度升高,地表径流显著增强,污染物随径流迁移加剧,植被开始发挥截留、过滤和沉降作用<sup>[44]</sup>,使水质净化-生境维持/产水量之间呈协同效应。在人为活动因子中,人口对产水量-生境维持、水质净化-碳固存等关系的影响呈现显著的非线性阈值特征,在低密度( $203 \sim 558\text{ 人}/\text{km}^2$ )下,适度的人类活动如水利建设、植被恢复可促进水土协调利用,表现为正向驱动;一旦超越此阈值,高强度开发导致景观破碎化、自然地表硬化和水资源超采,则急剧加剧服务冲突,驱动方向转为强烈负向<sup>[45-46]</sup>。直接解释重庆主城区及沿江河谷等人类活动密集区成为显著权衡热点。建设用地扩张(通过夜间灯光指数、建设用地占比表征)是破坏服务协同的重要人为驱动因子,尤其在东西部城市边缘区表现突出。因此,未来的生态修复策略必须综合评估生态系统服务的多样性和复杂性,并将其与自然条件、城市规划和土地管理紧密结合,通过科学规划和管理,实现生态系统服务之间的协同优化,以促进生态保护的长期可持续性。

## 4 结论

1)生态屏障区生态系统服务具有较强的时空异质性。产水量、土壤保持、碳固存主要呈上升趋势,生境维持、水质净化呈现出持续下降趋势。产水量、土壤保持、生境维持、水质净化高值区分布具有一定的相似性,主要分布在中部和东部较高海拔区域;碳固存由中部向两端递减的趋势。

2)生态屏障区生态系统服务具有较强的空间异质性和尺度依赖性。产水量、土壤保持、碳固存、生

境维持在中部及东部区域均以协同关系为主导,水质净化服务协同空间分布较为分散,与三峡库区生态系统服务权衡与协同关系整体差异较大。

3)自然因子显著影响着生态系统服务权衡与协同关系变化。降水增长率对生态系统服务间的权衡与协同关系具有主导性作用;植被因子无限制增大可能对加剧生态系统服务间的权衡效应;地形因子在适度范围内能够显著增加生境维持-碳固存-土壤保持之间的协同效应。人口密度的无限制增大会加剧生态系统间的权衡。

### 参考文献:

- [1] 赵筱青,石小倩,李驭豪,等.滇东南喀斯特山区生态系统服务时空格局及功能分区[J].地理学报,2022,77(3):736-756.  
ZHAO X Q, SHI X Q, LI Y H, et al. Spatio-temporal pattern and functional zoning of ecosystem services in the karst mountainous areas of southeastern Yunnan[J].Acta Geographica Sinica,2022,77(3):736-756.
- [2] SHACKELFORD N, HOBBS R J, BURGAR J M, et al. Primed for change: Developing ecological restoration for the 21st century[J].Restoration Ecology,2013,21(3):297-304.
- [3] CHEN H, FLESKENS L, SCHILD J, et al. Impacts of large-scale landscape restoration on spatio temporal dynamics of ecosystem services in the Chinese Loess Plateau[J].Landscape Ecology,2022,37(1):329-346.
- [4] LI R N, ZHENG H, O'CONNOR P, et al. Time and space catch up with restoration programs that ignore ecosystem service trade-offs[J].Science Advances,2021,7(14):eabf8650.
- [5] 勾蒙蒙,李乐,刘常富,等.大宁河流域生态系统服务权衡关系梯度效应[J].生态学报,2022,42(18):7445-7457.  
GOU M M, LI L, LIU C F, et al. Gradient effects of ecosystem service trade-off relationships in the Daning River basin[J].Acta Ecologica Sinica,2022,42(18):7445-7457.
- [6] 荔童,梁小英,张杰,等.基于贝叶斯网络的生态系统服务权衡协同关系及其驱动因子分析:以陕北黄土高原为例[J].生态学报,2023,43(16):6758-6771.  
LI T, LIANG X Y, ZHANG J, et al. Ecosystem service trade-off and synergy relationship and its driving factor analysis based on Bayesian belief network: A case study of the Loess Plateau in northern Shaanxi Province[J].Acta Ecologica Sinica,2023,43(16):6758-6771.
- [7] YOHANNES H, SOROMESSA T, ARGAW M, et al. Spatio-temporal changes in habitat quality and linkage with landscape characteristics in the Beressa water-

- shed, Blue Nile basin of Ethiopian Highlands[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 281: e111885.
- [8] 岳奕帆, 赵文智, 刘任涛, 等. 宁夏荒漠草原带生态环境质量时空变化及其驱动机制[J]. *生态学报*, 2024, 44(20): 9067-9080.
- YUE Y F, ZHAO W Z, LIU R T, et al. Spatiotemporal changes and driving mechanisms of eco-environmental quality in the desert steppe zone of Ningxia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(20): 9067-9080.
- [9] 魏雷晗冰, 时鹏, 魏勇, 等. 窟野河流域生态系统服务功能变化及其驱动因素分析[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(4): 222-235.
- WEI L H B, SHI P, WEI Y, et al. Analysis of ecosystem service function changes and their driving factors in the Kuye River basin[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(4): 222-235.
- [10] 温婉琴, 王强, 陈田田. 整合生态系统服务与驱动因素阈值效应的生态安全分区研究: 以西南地区为例[J]. *生态学报*, 2024, 44(8): 3142-3156.
- WEN W Q, WANG Q, CHEN T T. Integrating the threshold effects of driving forces on ecosystem service into the ecological security zoning: A case study in the southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(8): 3142-3156.
- [11] DU P Y, HUAI H J, WU X Y, et al. Using XGBoost-SHAP for understanding the ecosystem services trade-off effects and driving mechanisms in ecologically fragile areas[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2025, 16: e1552818.
- [12] 刘颂, 张浩鹏, 裴新生, 等. 长时间序列生态系统服务权衡与协同驱动因素: 以芜湖市生态系统服务功能极重要区为例[J]. *生态学报*, 2024, 44(5): 1780-1790.
- LIU S, ZHANG H P, PEI X S, et al. Drivers of ecosystem service trade-off and synergy in long-term sequence: A case study of the extremely important ecosystem service function area in Wuhu City [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(5): 1780-1790.
- [13] 曾凯豪, 唐健, 杨剩富. 土地利用功能权衡协同关系及其驱动因子研究: 以武汉市为例[J]. *中国土地科学*, 2024, 38(6): 66-77.
- ZENG K H, TANG J, YANG S F. Research on trade-offs and synergy relationship of land use functions and the driving factors: A case study in Wuhan[J]. *China Land Science*, 2024, 38(6): 66-77.
- [14] ZHOU B, CHEN G P, YU H R, et al. Revealing the nonlinear impact of human activities and climate change on ecosystem services in the karst region of southeastern Yunnan using the XGBoost-SHAP model[J]. *Forests*, 2024, 15(8): e1420.
- [15] JOSHI G, SRIVASTAVA A, YAGNIK B, et al. Explainable misinformation detection across multiple social media platforms[J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 23634-23646.
- [16] NGUYEN H, NGUYEN T, PHAN Tet al. Explainable artificial intelligence model for evaluating shear strength parameters of municipal solid waste across diverse compositional profiles [J]. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2025, 15: e100578.
- [17] 胡友兵, 李致家, 冯杰, 等. 三峡库区生态屏障范围界定[J]. *水利学报*, 2012, 43(10): 1248-1253.
- HU Y B, LI Z J, FENG J, et al. Study on a method to define ecological barrier range in Three Gorges Reservoir area[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(10): 1248-1253.
- [18] 姜永华, 江洪, 曾波, 等. 三峡库区(重庆段)土地利用变化对生态系统服务价值的影响分析[J]. *水土保持研究*, 2008, 15(4): 234-237.
- JIANG Y H, JIANG H, ZENG B, et al. Effects of land use change on the ecosystem services value of Three Gorges Reservoir area (the part of Chongqing) [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2008, 15(4): 234-237.
- [19] 范语馨, 史志华. 基于模糊层次分析法的生态环境脆弱性评价: 以三峡水库生态屏障区湖北段为例[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(1): 91-96.
- FAN Y X, SHI Z H. Eco-environmental vulnerability assessment based on fuzzy analytic hierarchy process: A case study in the ecological shelter zone of Three Gorges Reservoir area in Hubei Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(1): 91-96.
- [20] 刘文瑞, 李晓婷, 李彤, 等. 基于MODIS和CASA模型的伊春市森林植被NPP变化特征及其影响因子分析[J]. *生态学杂志*, 2022, 41(1): 150-158.
- LIU W R, LI X T, LI T, et al. Spatiotemporal variations of forest NPP and related driving factors based on MODIS and CASA models in Yichun[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(1): 150-158.
- [21] 陈正发, 龚爱民, 宁东卫, 等. 基于RUSLE模型的云南省土壤侵蚀和养分流失特征分析[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(6): 7-14.
- CHEN Z F, GONG A M, NING D W, et al. Characteristics of soil erosion and nutrient loss in Yunnan Province based on RUSLE model[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(6): 7-14.
- [22] 杨绍微, 刘建锋, 旷远文, 等. 江西省生态系统服务的权衡与协同关系时空动态及其驱动力[J]. *生态学杂志*, 2025, 44(1): 216-225.

- YANG S W, LIU J F, KUANG Y W, et al. Spatiotemporal dynamics and driving forces of trade-offs and synergies among ecosystem services in Jiangxi Province [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2025, 44(1): 216-225.
- [23] 杨文越, 叶泓好. 基于生境质量的粤港澳大湾区生态网络识别[J]. *生态学报*, 2023, 43(24): 10430-10442.
- YANG W Y, YE H Y. Identification of ecological networks in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on habitat quality assessment [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(24): 10430-10442.
- [24] 杨蕊, 邓文彬. “三生空间”视角下乌鲁木齐土地利用转型及生态环境效应分析[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(14): 5742-5752.
- YANG R, DENG W B. Land use function transformation in the Urumqi based on ecological-production-living spaces and associated eco-environment effects [J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(14): 5742-5752.
- [25] 叶敦雨, 孙小银, 单瑞峰. 南四湖流域近45 a水质净化服务功能的时空演变及其影响因素[J]. *生态与农村环境学报*, 2023, 39(8): 990-998.
- YE D Y, SUN X Y, SHAN R F. Study on the spatio-temporal changes of water purification service function and its influencing factors of Nansihu Lake basin for 45 years [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023, 39(8): 990-998.
- [26] 何刘洁, 郑博福, 万炜, 等. 长江经济带生态系统服务权衡与协同及其驱动因素[J]. *环境科学*, 2024, 45(6): 3318-3328.
- HE L J, ZHENG B F, WAN W, et al. Trade-off and synergy of ecosystem services in the Yangtze River economic belt and its driving factors [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(6): 3318-3328.
- [27] 冯应斌, 何建, 杨庆媛. 三峡库区生态屏障区土地利用规划生态效应评估[J]. *地理科学*, 2014, 34(12): 1504-1510.
- FENG Y B, HE J, YANG Q Y. Evaluation of ecological effects in land use planning: A case study of ecological barrier zone of Three Gorges Reservoir area [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(12): 1504-1510.
- [28] GOU M M, LI L, OUYANG S, et al. Integrating ecosystem service trade-offs and rocky desertification into ecological security pattern construction in the Daning river basin of southwest China [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 138: e108845.
- [29] WANG Z Z, FU B J, WU X T, et al. Distinguishing trajectories and drivers of vegetated ecosystems in China's Loess Plateau [J]. *Earth's Future*, 2024, 12(2): e2023EF003769.
- [30] 谭洁, 危千骏, 廖朝阳, 等. 基于XGBoost-SHAP可解释机器学习模型的城市形态与地表温度的关系[J]. *应用生态学报*, 2025, 36(3): 659-670.
- TAN J, WEI Q J, LIAO Z Y, et al. Relationship between urban form and surface temperature based on XGBoost SHAP interpretable machine learning model [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2025, 36(3): 659-670.
- [31] LUNDBERG S M, SUIN L. A unified approach to interpreting model predictions [J]. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2017, 30: 4765-4774.
- [32] 周瑞娇, 张虹, 钱敏. 近30年三峡库区生态系统服务流时空演变与影响因素研究[J]. *生态环境学报*, 2025, 34(6): 876-887.
- ZHOU R J, ZHANG H, QIAN M. Spatial-temporal evolution of ecosystem service flows in the Three Gorges Reservoir area in the past 30 years and influencing factors [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2025, 34(6): 876-887.
- [33] 勾蒙蒙, 刘常富, 肖文发, 等. 基于生态系统服务供需关系的长江三峡库区分区管理[J]. *陆地生态系统与保护学报*, 2022(4): 1-12.
- GOU M M, LIU C F, XIAO W F, et al. Ecological zoning management strategies based on ecosystem service supply and demand [J]. *Terrestrial Ecosystem and Conservation*, 2022(4): 1-12.
- [34] 孟浩斌, 周启刚, 李明慧, 等. 三峡库区生态系统服务时空变化及权衡与协同关系研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(5): 566-575.
- MENG H B, ZHOU Q G, LI M H, et al. Study of the spatio-temporal changes in ecosystem services and trade-offs/synergies relationship in the Three Gorges Reservoir area [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(5): 566-575.
- [35] 刘明宇. 1995—2015年三峡库区生态系统服务功能时空演变研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
- LIU M Y. Spatial and temporal evolution of ecosystem services in three gorges reservoir area from 1995 to 2015 [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022.
- [36] GOU M M, LI L, OUYANG S, et al. Identifying and analyzing ecosystem service bundles and their socioecological drivers in the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 307: e127208.
- [37] 闫晓露, 李欣媛, 刘澄浩, 等. 生态系统服务簇空间演变轨迹及其社会-生态驱动的地理探测: 以大连市为例[J]. *生态学报*, 2022, 42(14): 5734-5747.
- YAN X L, LI X Y, LIU C H, et al. Spatial evolution trajectory of ecosystem service bundles and its social-ecological driven by geographical exploration: A case study of Dalian [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(14): 5734-5747.

- [38] 喇露梦, 勾蒙蒙, 李乐, 等. 三峡库区生态系统服务权衡时空动态与情景模拟: 以秭归县为例[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(11): 1368-1377.
- LA L M, GOU M M, LI L, et al. Spatiotemporal dynamics and scenarios analysis on trade-offs between ecosystem service in Three Gorges Reservoir area: A case study of Zigui County [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(11): 1368-1377.
- [39] 刘铮, 杨金贵, 马理辉, 等. 黄土高原草地净初级生产力时空趋势及其驱动因素[J]. 应用生态学报, 2021, 32(1): 113-122.
- LIU Z, YANG J G, MA L H, et al. Spatial-temporal trend of grassland net primary production and their driving factors in the Loess Plateau, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(1): 113-122.
- [40] LI M, WU J S, SONG C Q, et al. Temporal variability of precipitation and biomass of alpine grasslands on the northern Tibetan Plateau [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(3): e360.
- [41] 张琨, 吕一河, 傅伯杰, 等. 黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 949-960.
- ZHANG K, LYU Y H, FU B J, et al. The effects of vegetation coverage changes on ecosystem service and their threshold in the Loess Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(5): 949-960.
- [42] 王鹭, 高建恩, 龙韶博, 等. 延河流域典型治理阶段的土壤保持功能时空变化及驱动因素分析[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 94-102.
- WANG L, GAO J E, LONG S B, et al. Temporal and spatial variation of soil conservation function and its driving factors in typical reclamation stage in Yanhe River basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(03): 94-102.
- [43] 贺军, 刘卫敏, 南宏伟, 等. 基于小区观测的坡改梯工程水保效应机理研究[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 32-43.
- HE J, LIU W M, NAN H W, et al. A study on effect mechanism of soil and water conservation of slope-to-terrace engineering based on runoff plots [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation* 2023, 43(1): 32-43.
- [44] 左丽媛, 姜远, 高江波, 等. 生态保护红线区生态系统服务多维驱动力的定量分离[J]. 地理学报, 2022, 77(9): 2174-2188.
- ZUO L Y, JIANG Y, GAO J B, et al. Quantitative separation of multi-dimensional driving forces of ecosystem services in the ecological conservation red line area [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(9): 2174-2188.
- [45] 欧阳晓, 王坤, 魏晓. 城乡建设用地关联对生态系统服务的影响: 以洞庭湖地区为例[J]. 生态学报, 2022, 42(21): 8713-8722.
- OUYANG X, WANG K, WEI X. Impacts of urban-rural construction land linkages on ecosystem services: A case study of Dongting Lake area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(21): 8713-8722.
- [46] 张紫怡, 全照民, 张立亭, 等. 景观格局对生态系统服务的非线性影响和阈值调控: 以福建省生态高效协同区为例[J]. 生态学报, 2024, 44(21): 9535-9551.
- ZHANG Z Y, TONG Z M, ZHANG L T, et al. Non-linear effects of landscape pattern on ecosystem services and threshold regulation: A case study of eco-efficient synergistic zone in Fujian Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(21): 9535-9551.