

黄河中游昕水河流域生态系统服务权衡的类型识别、关系网络与驱动机制

段宝玲¹, 冯强^{1*}, 王晶², 付勇勇¹, 徐建斌¹

1. 山西财经大学资源环境学院, 山西太原 030006

2. 中国科学院生态环境研究中心, 区域与城市生态安全全国重点实验室, 北京 100085

摘要: 研究生态系统服务权衡机制能够深化生态系统服务理论, 为流域生态保护修复提供理论支撑。本研究运用 InVEST 模型评估黄河中游昕水河流域 2000—2020 年土壤保持、固碳与产水服务; 利用均方根偏差法将土壤保持与固碳服务相对占优识别为 1 型权衡、产水服务相对占优识别为 2 型权衡, 并计算权衡强度; 利用偏相关网络与沙普利加性解释方法揭示权衡的关系网络与驱动阈值。结果表明: ①2000—2020 年昕水河流域 1 型与 2 型固碳-产水权衡均呈上升趋势; 2020 年 1 型权衡在空间上占主导的趋势被逆转。1 型与 2 型土壤保持-产水权衡分别呈波动下降与上升趋势; 1 型权衡在空间上往往处于主导地位, 但 2020 年其强度下降且覆盖面积萎缩。②1 型固碳-产水权衡与林地和耕地面积比例及年降水量分别表现为正相关、负相关和负相关, 1 型土壤保持-产水权衡与年降水量呈负相关。两类 2 型权衡相似, 均与林地面积比例、年均气温呈负相关, 与建设用地面积比例呈正相关。土地利用类型、年降水量、人口密度具有较高的节点强度, 是权衡网络调控的关键节点。③林地面积比例为 25%~75% 时对 1 型固碳-产水权衡的促进作用最强。建设用地面积比例持续强化 2 型固碳-产水权衡; 2 型权衡对耕地、林地、草地面积比例等的非线性响应方向与 1 型权衡差异明显。年降水量能够抑制 1 型土壤保持-产水权衡, 但超过 650 mm 后趋势逆转; 年均气温以 8 °C 和 10 °C 为临界点, 对 2 型权衡的影响表现为“缓慢抑制—快速抑制—促进”的三阶段特征。因此, 1 型权衡与 2 型权衡的时空趋势存在差异, 偏相关网络与 SHAP 依赖图的有效结合揭示了生态系统服务权衡这一复杂系统的宏观与局部特征。

关键词: 生态系统服务权衡; 偏相关网络; 沙普利加性解释; 影响因素; 昕水河流域

中图分类号: X171.4

文章编号: 1001-6929(2026)03-0712-15

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2025.12.20

Type Identification, Relationship Network, and Driving Mechanisms of Ecosystem Service Trade-Offs in the Xinshui River Basin, Middle Reaches of the Yellow River

DUAN Baoling¹, FENG Qiang^{1*}, WANG Jing², FU Yongyong¹, XU Jianbin¹

1. College of Resources and Environment, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan 030006, China

2. State Key Laboratory of Regional and Urban Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100085, China

Abstract: Investigating the trade-offs mechanisms among ecosystem services (ESs) can deepen ES theory and provide theoretical support for ecological protection, restoration and sustainable development of river basins. In this study, the InVEST model was used to quantify soil conservation, carbon sequestration, and water yield in the Xinshui River Basin from 2000 to 2020. The root mean square deviation method was used to identify Type 1 trade-offs when soil conservation and carbon sequestration were relatively dominant, and type 2 trade-offs when water yield was relatively dominant; trade-offs intensity were also quantified. Partial correlation networks and the Shapley Additive exPlanations (SHAP) method were utilized to reveal relationship networks and driving thresholds of ecosystem service trade-offs.

收稿日期: 2025-10-03 修订日期: 2025-12-26

作者简介: 段宝玲(1981-), 女, 山西祁县人, 副教授, 博士, 主要从事资源环境评价与区域规划研究, sxnddbl@163.com

* 责任作者: 冯强(1981-), 男, 辽宁凌海人, 副教授, 博士, 主要从事土地利用与生态系统服务研究, fengqiang921@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.42201265); 教育部人文社会科学研究项目(No.25YJAZH039, 25YJCZH050)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No.42201265); Humanities and Social Science Fund of Ministry of Education of China(No.25YJAZH039, 25YJCZH050)

The results showed that: (1) From 2000 to 2020, both Type 1 and Type 2 carbon sequestration-water yield trade-offs showed increasing trends. By 2020, the previously dominant spatial pattern of Type 1 trade-offs were reversed, and Type 2 trade-offs began to expand from the northwest to the south. Meanwhile, Type 1 and Type 2 soil conservation-water yield trade-offs exhibited fluctuating decreasing and increasing trends, respectively. Although Type 1 trade-offs generally dominated spatially, their intensity weakened and spatial extent contracted by 2020. (2) The Type 1 trade-offs between carbon sequestration and water yield were positively correlated with the proportion of forest area and negatively correlated with the proportion of cropland area and annual precipitation, respectively. The Type 1 soil conservation-water yield trade-offs showed a negative correlation with annual precipitation. Both categories of Type 2 trade-offs exhibited similar patterns, being negatively correlated with the proportion of forest area and mean annual temperature, and positively correlated with the proportion of construction land area. Land-use type, annual precipitation, and population density showed high node strengths and acted as key regulatory nodes within the trade-offs network. (3) The proportion of forest area exerted its strongest promoting effect on the Type 1 carbon sequestration-water yield trade-offs when it ranged between 25% and 75%. Annual precipitation exceeding 680 mm significantly suppressed the trade-offs. The proportion of construction land area consistently enhanced the Type 2 carbon sequestration-water yield trade-offs. Nonlinear responses of Type 2 trade-offs to proportion of cropland area, proportion of forest area, proportion of grassland area, mean annual temperature, and annual precipitation differed markedly from those of Type 1 trade-offs, highlighting the ecological differences between the two types of trade-offs. Precipitation suppressed the Type 1 soil conservation-water yield trade-offs, but a trend reversal occurred beyond 650 mm. An increase in GDP led to a fluctuating decline in trade-offs intensity. With mean annual temperature thresholds at 8 °C and 10 °C, its effect on Type 2 trade-offs exhibited a three-phase pattern of ‘slow inhibition-rapid inhibition-promotion’. When annual precipitation exceeded 620 mm, its effect shifted from suppressing trade-offs to intensifying them. Overall, there are differences in the spatiotemporal trends between Type 1 and Type 2 trade-offs, and the integrated application of partial correlation networks and SHAP dependence analysis effectively reveals both macro-scale patterns and local nonlinear characteristics of the complex system of ecosystem service trade-offs.

Keywords: ecosystem service trade-offs; partial correlation network; Shapley Additive exPlanations (SHAP); driving factors; Xinshui River Basin

生态系统服务是指人类从生态系统中获得的各种惠益,构成人类生存与发展的环境基础^[1]。生态系统服务权衡的核心内涵是某一类生态系统服务在供给能力提升的过程中,需以牺牲其他类型生态系统服务的供给水平为前提,具体表现为一类生态系统服务增长、另一类相应减少的时空关联^[2]。各类生态系统服务及其权衡对驱动因素的响应规律具有显著差异,体现在变化趋势、强度、速率及临界值等多个方面,使得“生态系统服务-权衡关系-影响因素”之间构成一个非线性的复杂系统^[3-4]。因此,生态系统服务权衡的驱动机制研究成为生态学与环境学领域的重要议题,多角度的权衡解析有助于提高生态环境管理的科学化与精细化水平,促进区域生态安全与可持续发展^[5-7]。

生态系统服务权衡研究可以分为定性研究与定量两大类。其中,定性研究往往利用相关分析、空间叠置、双变量局部空间自相关等方法,通过生态系统服务变化方向与空间集聚特征确定服务之间是此消彼长的权衡关系或同步变化的协同关系^[8-9],形成特定时空尺度下生态系统服务间相互作用与反馈关系的基础认知。定量研究能够明确生态系统服务间的冲突强度,成为权衡研究的主流方向。不同学科领域的定量

方法被应用于权衡量化,相关系数和均方根偏差分别从相关性和均衡性两个方面刻画生态系统服务间关联,是权衡量化最为简便且应用广泛的方法^[10]。生产可能边界通过其曲线斜率量化并可视化生态系统服务间的权衡强度,为资源环境的优化管理提供了具体路径^[11]。基于权衡概念的“生态系统服务替代度”也被用于直接量化权衡强度^[12]。基于二次定向输出距离函数估算的森岛替代弹性,是量化权衡强度的一种较为新颖的经济学方法^[13]。可见,不同领域的定量分析方法与优化工具各有所长,共同推动着权衡量化手段的补充与深化。但是,已有研究中较少考虑生态系统服务的消长方向,例如,毁林开荒导致粮食供给服务增加但土壤保持服务下降(权衡类型1),而退耕还林会导致两项服务增减方向逆转(权衡类型2)。可见,毁林开荒与退耕还林均导致了粮食供给与土壤保持服务间的权衡,如不进行权衡类型识别,相关系数或均方根偏差刻画的权衡强度将不能区分各类生态过程的作用。因此,基于两项生态系统服务的消长方向识别权衡类型,将为权衡机制解析提供更为丰富的视角^[3]。

生态系统服务权衡驱动机制是多项生态系统服务联合管理的理论基础,近年来受到学者的广泛关注,

研究尺度涵盖小流域、流域、区域、国家等,涉及农业生产、植被恢复、城市规划与城市群建设等诸多领域^[14-17]。已有研究通过回归分析、冗余分析、贝叶斯网络、地理探测器、随机森林模型等方法探究了生态系统服务权衡驱动因素^[3-4,7,12,18]。然而,由于生态系统服务权衡与驱动因素之间常呈现复杂的非线性关系,使得解析其内在机制的难度增加,从而制约了对该复杂系统的完整认知。偏相关网络方法对探析复杂系统的整体关联结构具有优势,能直观展现生态系统服务权衡与驱动因素之间的相互作用及反馈关系,其适用性已在黄土高原生态系统服务研究中得到验证^[19],但是该方法不能揭示驱动因素的阈值特征。沙普利加性解释(SHAP)方法善于解释各种机器学习模型,SHAP依赖图基于合作博弈论中的沙普利值概念,能直观展示单个特征对模型预测结果的影响,成为识别驱动阈值的前沿方法^[20-22]。因此,整合偏相关网络与SHAP依赖图能够突破已有研究中仅用单一方法的局限,同时揭示复杂系统的宏观与局部特征,为全面解析生态系统服务权衡机制提供了新途径。

黄河中游昕水河流域地处黄土高原腹地,水土流失严重,是黄河流域生态环境建设的重点区域。多年的生态修复活动使得该流域出现了黄土高原地区典型的生态系统服务权衡问题——固碳与土壤保持增强的同时产水服务下降^[23-24]。已有研究针对昕水河流域的土壤侵蚀、水沙关系、土地利用变化与碳储量等方面进行了较多探讨^[23-25],但是对生态系统服务权衡及其驱动机制的关注不足,制约了多项生态系统服务的联合管理实践。因此,本研究基于InVEST模型估算昕水河流域2000—2020年土壤保持、固碳与产水服务,识别权衡类型,综合运用偏相关网络、随机森林模型与沙普利加性解释等方法,揭示生态系统服务及其权衡的时空分异特征,阐释生态系统服务权衡与驱动因素的关系网络,识别影响因素对生态系统服务权衡的驱动阈值,以期深化生态系统服务权衡理论,为黄河中游生态脆弱区生态系统服务的精准调控与可持续管理提供科学依据与决策支持。

1 研究区域概况与研究方法

1.1 研究区概况

昕水河是黄河一级支流,位于黄河中游东部的山西省境内,流域面积约4326 km²(见图1)。流域属黄土高原残垣和梁状丘陵沟壑区,总体地势由东至西逐渐降低,地形破碎,沟壑密度大。流域属温带大陆性季风气候,降水集中于6—9月,水土流失严重,长期以来一直是黄土高原水土保持与生态环境综合治理

的重点区域之一。流域属于落叶阔叶林和森林草原带,随着国家退耕还林等重点生态工程的持续实施,植被覆盖度显著提升,土壤保持与固碳等生态系统服务提高的同时产水量下降,产生了典型的生态系统服务权衡问题,使其成为本研究的理想场所。

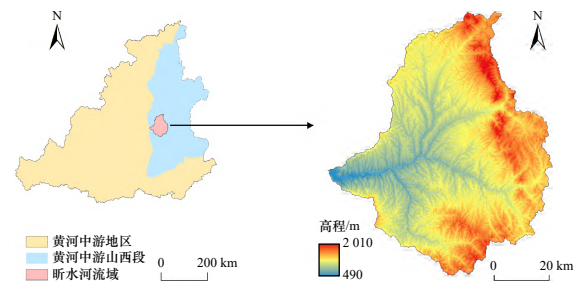


图1 昕水河流域地理位置及高程
Fig.1 Location and elevation of Xinshui River Basin

1.2 数据来源

流域数字高程模型在地理空间数据云平台下载(<https://www.gscloud.cn>),用于土壤保持服务与坡度计算;降水量、蒸散发、归一化植被指数与土壤栅格数据通过国家地球系统科学数据中心(<https://www.geodata.cn>)获取,用于土壤保持、产水服务及对应驱动因素计算;土地利用类型、净初级生产力、国内生产总值与人口密度栅格数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>),用于土壤保持、固碳与产水服务及驱动因素计算。

1.3 生态系统服务评估

将研究区划分为324个小流域作为基本分析单元,通过InVEST模型土壤保持模块计算土壤保持服务,公式如下:

$$SC_x = R_x \times K_x \times LS_x (1 - C_x \times P_x) \times SR_x + I_x \quad (1)$$

式中: SC_x 为栅格单元 x 的土壤保持量, t/hm^2 ; SR_x 为泥沙输移比; I_x 为对上坡输出泥沙的拦截量, t/hm^2 ; R_x 为降雨侵蚀力因子, $MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h)$; K_x 为土壤可蚀性因子, $t \cdot hm^2 \cdot h/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$; LS_x 为坡度坡长因子; C_x 为植被覆盖与管理因子; P_x 为水土保持措施因子。

通过InVEST模型产水模块计算产水服务,公式如下:

$$Y_x = (1 - \frac{AET_x}{Pr_x}) Pr_x \quad (2)$$

式中: Y_x 为栅格单元 x 的产水量, mm ; AET_x 为实际蒸散发, mm ; Pr_x 为降水量, mm 。

参考《生态产品总值核算规范》,利用净初级生产力估算固碳服务^[26]:

$$CS = \alpha \times NPP \quad (3)$$

式中: CS 为固碳量, t/hm^2 ; NPP 为净初级生产力, t/hm^2 ; α 为 CS 和 NPP 的转换系数, 参考已有成果^[26] 确定。

1.4 生态系统服务权衡类型识别与权衡强度量化

采用均方根偏差法计算权衡强度^[27], 该方法简单便捷, 不仅能够计算两项生态系统服务的反向变化程度, 也能够衡量两项服务同向变化但步调不一致的情况, 同时该方法也便于对权衡进行分类, 其计算公式如下:

$$TR = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (ES_i - \overline{ES})^2} \quad (4)$$

式中, TR 为权衡强度, ES_i 为某项生态系统服务标准化值, \overline{ES} 为 n 项生态系统服务标准值的数学期望。

均方根偏差法的计算原理如图 2 所示, 其中某一散点距 1:1 线的距离即为该样点的权衡强度值。以往研究不考虑两项生态系统服务的相对占优情况, 而是将所有散点放在一起计算权衡强度。本研究将土壤保持与固碳服务相对占优识别为 1 型权衡、产水服务相对占优识别为 2 型权衡, 利用两类数据分别计算权衡强度。图 2 仅示意了 1 型和 2 型土壤保持-产水权衡, 固碳-产水权衡的类型识别方法相同, 不再赘述。

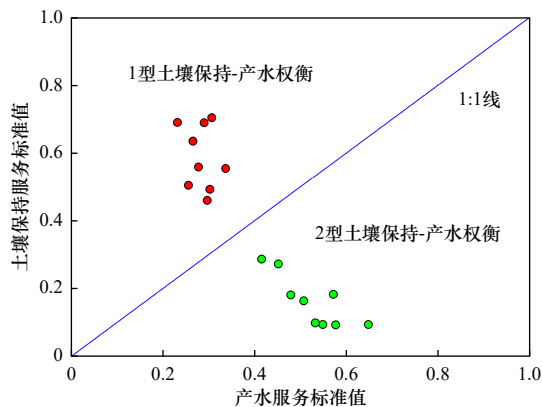


图 2 生态系统服务权衡类型识别示意

Fig.2 Schematic diagram for identifying types of ecosystem service trade-offs

1.5 数据分析

参考黄河中游地区的已有研究, 生态系统服务受地形、气候、植被、社会经济等因素的共同影响^[3], 同时考虑本研究时空尺度下数据的可得性, 选择年降水量、年均气温、坡度、国内生产总值、人口密度、归一化植被指数、主要土地利用类型面积比例 (简称“林地比例”、“草地比例”等) 作为权衡的驱动因素。基于偏相关网络方法阐释生态系统服务权衡与驱动因素的相互作用关系。在 R 语言环境下, 借助 bootnet

与 qgraph 包构建偏相关网络。通过 estimateNetwork 函数调用 EBICglasso 算法, 利用 spearman 方法度量相关性。进一步利用 centralityPlot 函数展示节点强度。最后, 采用 corStability 函数计算节点强度的相关稳定性系数 (CS), 以检验网络节点在样本扰动下的稳健性, 通常要求 CS 值不低于 0.25, 高于 0.5 则表示结果更为可靠^[28]。基于 SHAP 依赖图解析生态系统服务权衡的驱动阈值, 首先采用 randomForest 与 rfPermute 包完成随机森林模型训练与变量显著性检验, 然后采用 treeshap 包计算 SHAP 值, 最后采用 ggplot2 绘制 SHAP 依赖图。

2 结果与分析

2.1 生态系统服务的时空分异

由图 3 可知, 2000—2020 年昕水河流域固碳服务呈现持续增长趋势, 20 年来的增长率高达 121.2%。这一变化主要得益于流域内退耕还林等生态修复活动, 植被覆盖增加直接促进了碳汇能力增强。同时, 箱体的上下四分位数间距 (四分位距) 逐渐扩大, 表明不同区域固碳服务的空间异质性在 20 年间有所增加, 可能与土地利用类型的差异化管理有关。

2000—2015 年土壤保持服务略有提升, 平均值维持在 $147.1 \sim 182.9 t/hm^2$, 四分位距及上下须线间距变化较小, 说明此阶段土壤保持能力波动不显著; 但 2020 年土壤保持服务出现显著跃升, 平均值增至 $313.2 t/hm^2$, 且四分位距及上下须线间距明显增加, 这与降水增加直接相关。产水服务呈现先轻微下降后剧增的特征, 2000—2015 年平均值维持在 $17.7 \sim 34.7 mm$, 2015 年比 2000 年降低了 37.4%, 这是植被耗水增加与降水波动综合作用的结果; 但 2020 年产水服务显著增加, 相对 2000 年增加了 228.7%, 四分位距及上下须线间距也显著扩大, 原因是 2020 年流域降水量显著增加, 直接驱动了产水服务的增加。

流域东部和南部区域固碳水平较高 (见图 4), 原因是该区域林地覆盖面积大且林地质量较高。相比之下, 流域西部和北部地区固碳水平较低, 这些区域多为黄土残塬, 自然条件差, 不利于植被生长与碳固存。2000—2020 年固碳服务的空间格局总体表现为东部和南部高值区面积有所扩大, 而西部和北部低值区面积有所缩减, 这与流域内一系列生态修复工程密切相关。2000—2015 年土壤保持服务的空间趋势不明显, 除流域西部边缘土壤保持服务较低外, 其他区域高值与低值区相互交错, 15 年来空间格局变化不大, 这与流域内植被与地形地貌的交错分布相关。2020 年土壤保持服务高值区范围显著扩大, 这与当

年降水偏多、植被覆盖进一步改善有关。产水服务的空间分布与降水、地形和植被等因素密切相关, 2000 年与 2010 年产水服务高值区比例低, 散布于流域东部和南部; 2005 年高值区集中分布于流域北部;

2015 年高值区比例最低, 零星分布于流域西北部; 2020 年产水高值区占据整个流域。可见, 20 年来产水服务的时空趋势较为复杂, 在植被条件改善的大背景下降水突变成为其时空分异的重要外因。

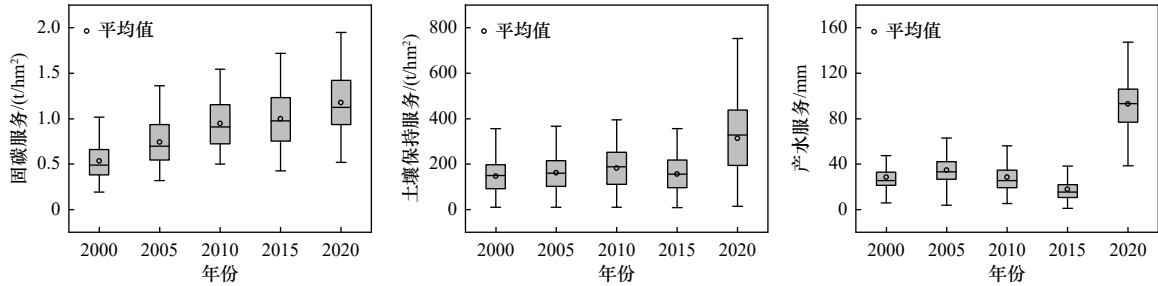


图 3 2000—2020 年昕水河流域生态系统服务变化情况

Fig.3 Temporal changes of ecosystem services in the Xinshui River Basin from 2000 to 2020

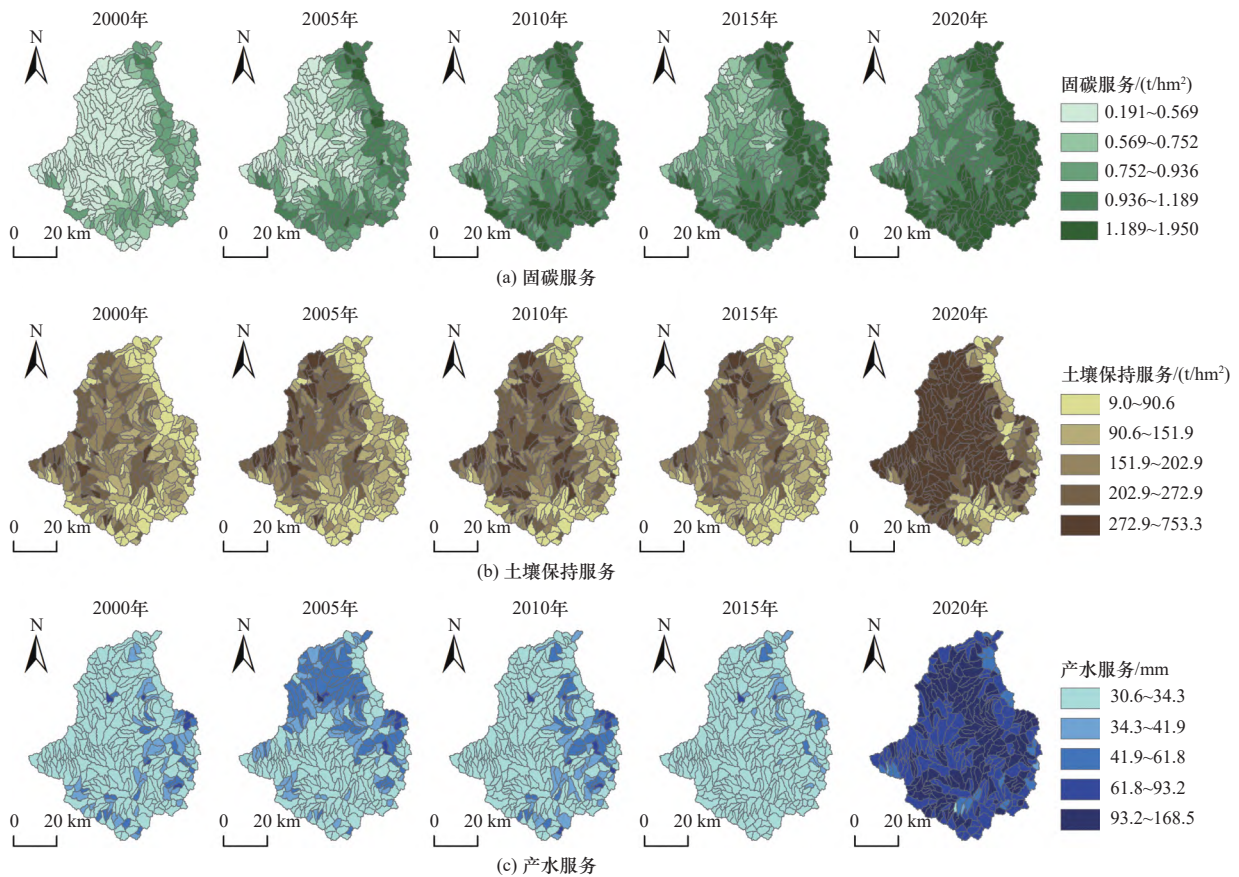


图 4 2000—2020 年昕水河流域生态系统服务空间分异

Fig.4 Spatial distribution of ecosystem services in the Xinshui River Basin from 2000 to 2020

2.2 生态系统服务权衡的时空分异

2000—2020 年 1 型固碳-产水权衡强度高于 2 型权衡, 且整体呈波动上升趋势, 2020 年 1 型和 2 型权衡强度相对 2000 年分别增加 30.3% 和 84.5%(见图 5)。一方面说明退耕还林等生态修复活动导致固碳服务占优的 1 型权衡在昕水河流域更为强烈, 固碳

能力增强带来产水下降的负效应不可忽视; 另一方面说明产水占优的 2 型权衡显现了更强的增长势头, 表明部分区域在固碳与产水服务之间可能出现两极分化, 这与降水变化相关。从数据波动来看, 1 型权衡箱图的四分位距及上下须线间距在 20 年间逐渐缩小, 说明其空间异质性有所降低, 这与流域内生态修复工

程的规模化推进有关,如林地分布更集中、植被结构更均质;2型权衡的箱体相对紧凑,仅2020年有所增

大,表明其空间差异长期稳定,也反映了产水服务占优的权衡强度受到了流域自然地理条件的约束。

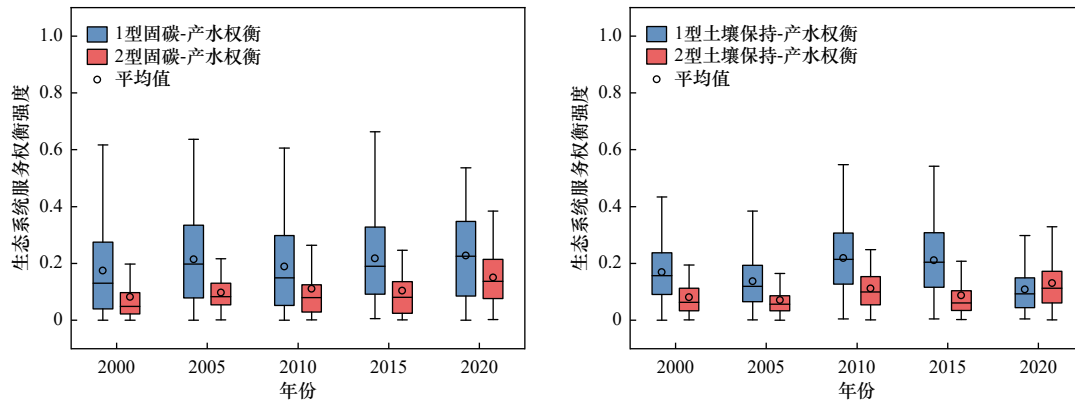


图5 2000—2020年两类生态系统服务权衡的变化情况

Fig.5 Temporal changes of the two types of ecosystem service trade-offs from 2000 to 2020

2000—2020年1型土壤保持-产水权衡呈现波动下降趋势,而2型权衡呈现波动上升趋势,两类权衡的时间趋势相对复杂。因此,将20年的时间趋势分成两个阶段:①2000—2015年1型土壤保持-产水权衡强度平均值从0.169升至0.211,2型权衡强度从0.080升至0.087,说明土壤保持占优更为强烈且增长态势更强,说明流域内的水土保持植被与工程措施效果明显;②2020年流域降水增加,削弱了1型权衡而增强了2型权衡,最终两类权衡强度趋于相同,与前15年的土壤保持-产水关系形成鲜明对比。从数据波动来看,1型权衡的四分位距及上下须线间距在2015年达到最大后显著收缩;2型权衡的四分位距及上下须线间距相对较小,但其在2020年明显增大。这说明土壤保持-产水关系对植被、土壤保持措施、降水的响应不同,土壤保持占优时其受三者的综合影响,而产水占优时降水的影响更大,因此增加了权衡数值的波动性。

1型固碳-产水权衡高值区主要分布于流域东部边缘和南部地区(见图6),该区域林地比例高,因此固碳服务相对占优。2型固碳-产水权衡高值区则分布于流域西北部,该区域耕地比例较高,植被覆盖度低,固碳能力整体较弱,但是植被蒸散耗水少,形成产水服务相对占优的2型权衡分布区域。2000—2015年1型权衡在空间上处于主导地位且呈扩张趋势,小流域数量占比从70.6%增加到77.6%,这是流域内生态修复工程带来的结果,即固碳增强但流域水资源供给面临不利局面。2020年该扩张趋势被逆转,2型权衡从西北部向南扩张,1型权衡的小流域数量占比萎缩至41.4%,说明较高降水量对固碳-产水关系既有趋

势的影响,在未来气候变化的背景下固碳-产水关系仍然存在较大的不确定性。

1型土壤保持-产水权衡高值区位于流域中部和西部地区,该区域实施了大量的水土保持工程措施(淤地坝、梯田建设、鱼鳞坑等)与植被措施(退耕还林还草等),林草地覆盖率高,土壤保持能力较强。2型土壤保持-产水权衡高值区主要位于流域北部、东部和南部的边缘地带,这些地区降水量较高,因此产水服务相对占优。2000—2015年两类权衡的空间位置相对稳定,1型权衡在空间上处于主导地位且小流域数量占比略有提升。2020年1型权衡强度下降且面积萎缩,2型权衡从流域边缘向中部扩张,小流域数量占比升至59.5%,说明较高降水量对土壤保持-产水关系具有深刻改变,生态系统服务管理中需高度重视。

2.3 生态系统服务权衡与驱动因素的关系网络

利用2020年生态系统服务权衡与驱动因素数据揭示偏相关网络结构,固碳-产水权衡与驱动因素的关系网络(见图7)分析显示,1型权衡与林地比例呈较强的正相关,与耕地比例呈较弱的负相关,这是因为林地有利于固碳服务的同时蒸散耗水也较多,而耕地的作用相反。1型权衡与年降水量呈较强的负相关,这是因为降水是产水服务的直接来源,削弱了固碳服务相对占优的1型权衡。此外,林地、草地与耕地比例两两之间表现出较强的负相关,体现了土地利用在空间上的互斥;人口密度与国内生产总值之间呈现较强的正相关,说明经济发展与人口聚集高度协同;年降水量与归一化植被指数的正相关说明气候条件对植被生长的重要影响以及植被对气候的反馈作用。

2型固碳-产水权衡与林地比例及年均气温均呈较强的负相关,说明林地耗水与高温蒸散作用对产水服务的抑制作用。2型权衡与建设用地比例呈较强的正

相关,原因是建设用地蒸散较小,降水能更多地转为产水服务。同时,土地利用类型与地形之间、社会经济因素与气候之间、植被指数与降水之间均存在

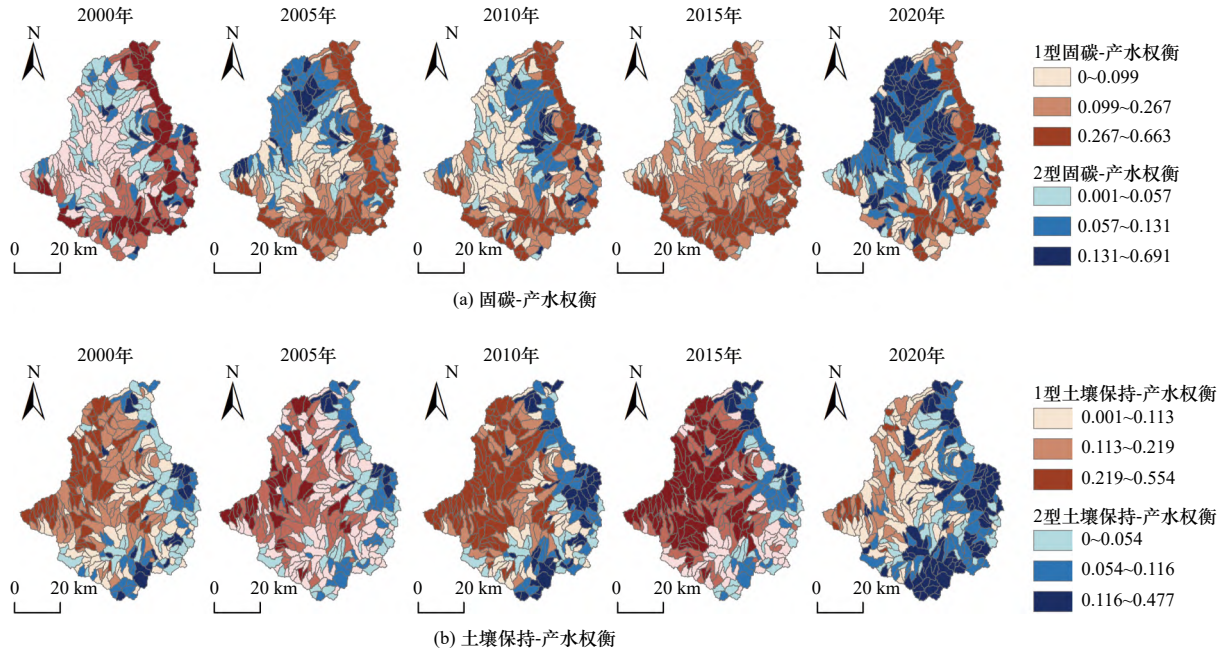
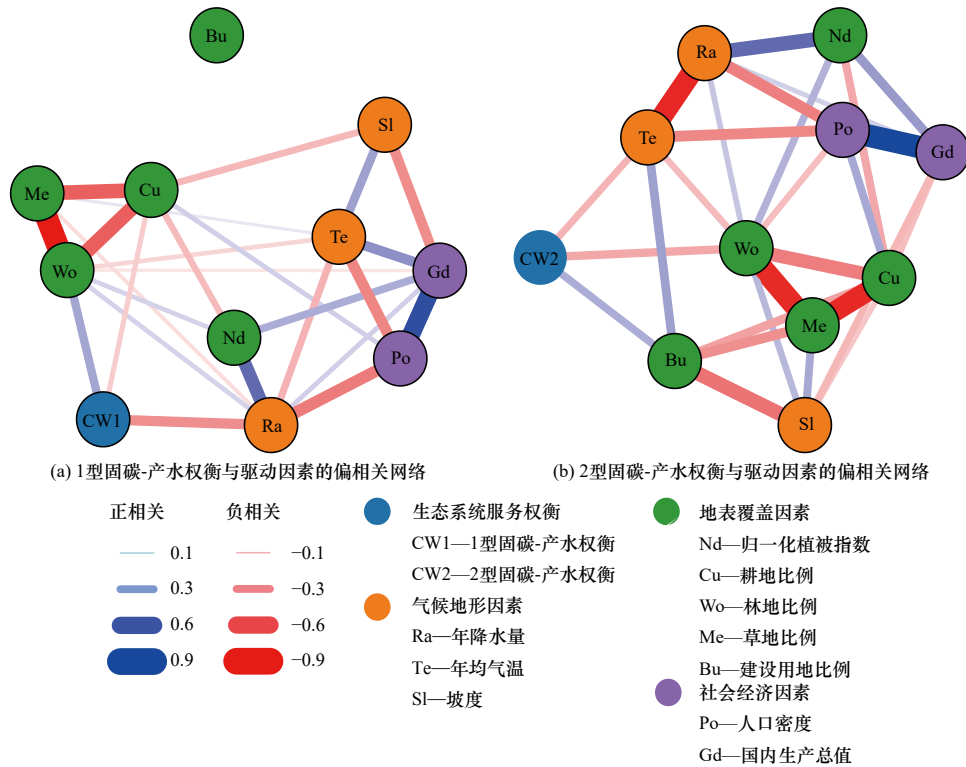


图6 2000—2020年两类生态系统服务权衡的空间分异

Fig.6 Spatial distribution of the two types of ecosystem service trade-offs from 2000 to 2020



注:节点连线的颜色与粗细表示指标间作用关系的方向与强度。

图7 两类固碳-产水权衡与驱动因素之间的偏相关网络

Fig.7 Partial correlation network for the two types of carbon sequestration-water yield trade-offs and their driving factors

较强的相互作用,体现了驱动因素之间复杂的关联关系。

1型水土保持-产水服务权衡仅与年降水量呈负相关,其他因素仅通过间接关联影响1型权衡(见图8)。降水是土壤侵蚀的直接动力,同时也是产水服务的直接来源,因此其最终表现为削弱水土保持占优的1型权衡。与固碳-产水权衡相似,土地利用类型与地形之间、社会经济与气候因素之间存在较强的关联。归一化植被指数是连接土地利用与社会经济及气候因素的关键节点,成为驱动因素关系调控的有力抓手。2型水土保持-产水权衡与年降水量及建设用地比例呈正相关,与年均气温及林地比例负相关,这与2型固碳-产水权衡的关系网络相似。驱动因素

之间的关联与1型水土保持-产水权衡相似,说明驱动因素通过相近的关联模式影响两类权衡,为权衡的统一调控提供了思路。

通过节点强度刻画各因子在网络中的地位,其值等于某一节点与网络中所有其他节点直接相连的边权重绝对值之和,强度越大表明其对网络的综合调控能力越强。由图9可见,林地比例、年降水量、国内生产总值与耕地比例在1型固碳-产水权衡关系网络中具有较高的节点强度。林地比例与年降水量各关联7个节点,成为网络中连接最广泛的节点,驱动1型固碳-产水权衡关系网络的发展演变。对于2型固碳-产水权衡关系网络,林地、耕地与草地比例及人口密度具有较高的节点强度。3类土地利用类型

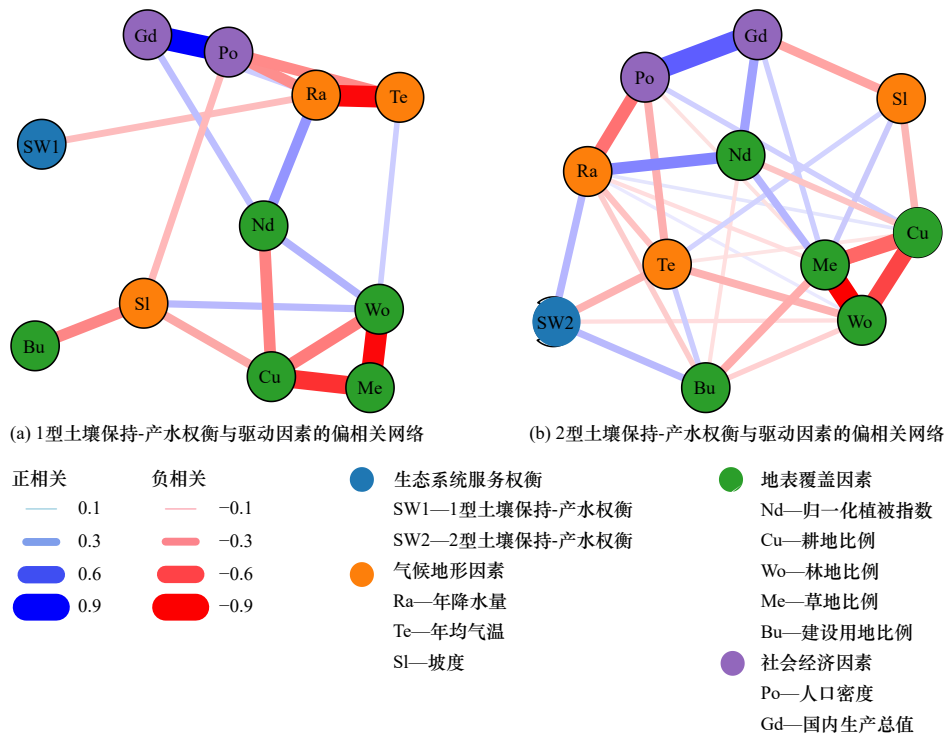


图8 两类水土保持-产水权衡与驱动因素之间的偏相关网络

Fig.8 Partial correlation network for the two types of soil conservation-water yield trade-offs and their driving factors

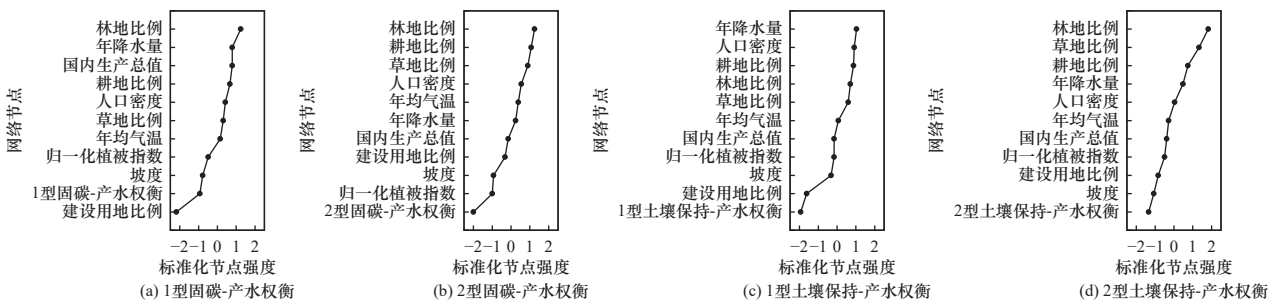


图9 生态系统服务权衡与驱动因素关系网络的节点强度分布特征

Fig.9 Node strength distribution in the relationship networks of ecosystem services trade-offs and their driving factors

与其他5~8个节点相关联,其变化可通过多条独立路径快速传递至整个社会-生态系统,成为调控生态网络的重要切入点。年降水量、人口密度、林地与耕地比例在1型土壤保持-产水权衡关系网络中具有较高的节点强度。年降水量共关联了5个节点,人口密度、林地与耕地比例分别关联了4个节点,其驱动路径较固碳-产水权衡更为简单。对于2型土壤保持-产水权衡关系网络,林地、草地与耕地比例及年降水量节点强度较高,与其他5~8个节点关系密切,这与2型固碳-产水权衡的关系网络相似,说明不同类型的权衡调控可以统筹考虑。上述权衡网络节点强度的稳定性系数为0.52~0.67,说明研究结果稳定可信。

2.4 影响因素对生态系统服务权衡的非线性驱动特征

利用2020年权衡强度与影响因素数据,基于随机森林模型揭示权衡影响因素的重要性与非线性驱动特征。林地比例、年降水量、耕地比例、草地比例、年均气温、归一化植被指数对1型固碳-产水权衡的影响较大并达到了显著水平($p < 0.05$)。对于1型固碳-产水权衡,SHAP值随林地比例升高呈单调递增趋势,林地比例小于25%时曲线平缓,处于25%~75%时曲线陡峭,说明随着林地面积增加,固碳量比蒸散耗水量增加更快,导致其对1型权衡的促进作用也在增强(见图10)。但是林地比例超过75%后曲线又趋于平缓,原因是林地覆盖很高时降水往往较高,林地加剧权衡的效应在一定程度上被抑制。年降水

量在680 mm以下时轻微抑制权衡,超过680 mm后则显著抑制权衡,说明较高降水往往成为产水服务的直接来源,会改变产水在固碳-产水关系中处于相对劣势的局面。耕地和草地比例对权衡的影响相似,能够抑制权衡强度,原因是二者生物量较低,蒸散发也低,更有利于产水服务。年均气温低于8.8 °C时,其对权衡产生抑制作用,空间上主要对应流域东部边缘地区,降雨及植被覆盖均较高,但最终产水的优势更为显著。年均气温超过8.8 °C后则表现为加剧权衡,降水及植被覆盖有所降低,气温加剧蒸散的作用较强,导致产水的相对劣势更为明显。归一化植被指数的作用以0.75和0.87为临界点可以分成抑制、加剧与抑制权衡三个阶段,在空间上主要对应西北部、中部以及东部边缘区域,三个阶段的主要生态过程如下:植被覆盖不足耗水较少、植被覆盖改善导致固碳与耗水同时增加、植被进一步改善对气候的反馈作用导致产水服务增加。

建设用地比例、耕地比例、年均气温、草地比例、林地比例和年降水量对于2型固碳-产水权衡的影响处于前六位且达到显著水平。SHAP值随建设用地比例升高呈递增趋势(见图11),原因是建设用地为不透水面,固碳能力弱且蒸散发很低,该作用强化了“产水占优-固碳受限”的趋势。耕地比例以20%和40%为临界点对2型权衡表现为轻微促进、强烈促进与抑制三个阶段。主要原因是耕地固碳能力与蒸散均较弱,形成促进2型权衡的主导趋势;然而耕地

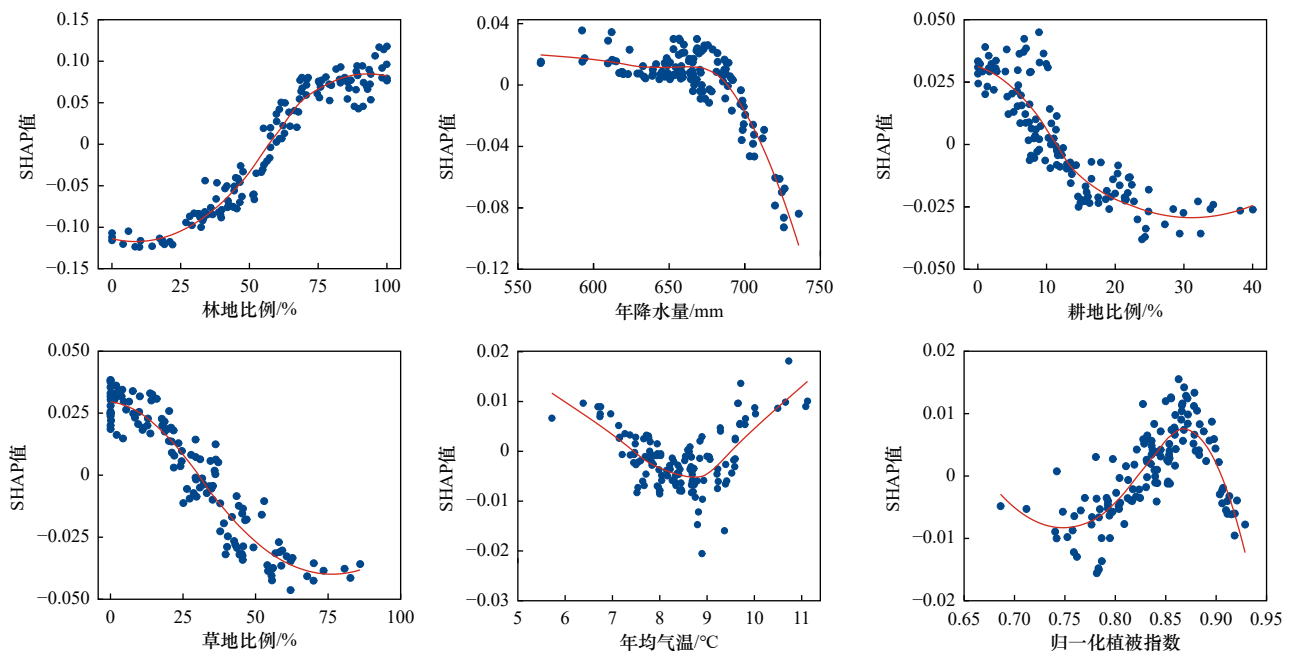


图10 主导因素对1型固碳-产水权衡的非线性作用

Fig.10 Nonlinear effects of dominant factors on the type 1 carbon sequestration-water yield trade-off

占比高的区域主要位于低海拔平川区, 气温较高增加耗水进而抑制权衡, 但是其在流域内并非主导趋势。年均气温对 2 型固碳-产水权衡的影响与其对 1 型权衡的影响相反, 以 8.8 °C 左右为临界点, 形成开口向下的抛物线趋势, 说明两类权衡具有相反的生态学含义。草地比例低于 60% 时轻度促进权衡, 超过后显著抑制权衡, 原因是草地比例较低时有利于产水但固碳不足, 草地较高时固碳与蒸散均提升, 降低产水占优的 2 型权衡。林地比例对 2 型固碳-产水权衡的作用趋势与其对 1 型权衡相反, 体现了林地的碳固存与蒸散作用。年降水量以 630 mm 为临界点, 对 2 型权衡形成了先促进后抑制的趋势, 原因是降水量增加往往会直接促进产水服务, 但是当降水增至 630 mm 后, 水资源的植被承载力也随之提高, 有利于植被生长并提升固碳能力, 最终抑制 2 型权衡。

年降水量、国内生产总值、年均气温、人口密度等因素对 1 型土壤保持-产水权衡的影响较大并达到显著水平。SHAP 值随降水量升高主体表现为递减趋势, 年降水量超过 650 mm 后趋势逆转但该趋势仅体现于少数小流域 (见图 12)。降水是土壤侵蚀的动力与产水的来源, 综合作用后产生抑制 1 型权衡为主的结果, 即降水对产水的促进作用更强。1 型权衡随国内生产总值表现为波动下降的趋势, 原因是国内生产总值增加意味着城镇建设与工农业活动增强, 对地表的干扰活动将降低土壤保持服务。1 型权衡随年均气温升高呈递增趋势, 以 10 °C 为临界点, 气温对权

衡的作用可以分为轻微促进与显著促进两个阶段, 体现了气温加剧蒸散发 (减弱产水) 与促进植被生长 (有利于土壤保持) 的双重作用。人口密度以 57 人/km² 为临界点, 1 型权衡随其增加呈“单峰型”变化趋势。人口密度较低时, 人类活动对土壤的干扰弱, 植被覆盖度高, 土壤保持能力强; 人口密度较高时, 人类活动干扰将加剧土壤侵蚀, 导致其作用趋势逆转。1 型权衡随坡度增加表现为波动增加的趋势, 原因是坡度增加导致土壤保持服务增加 (土壤保持量等于潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量之差, 坡度高会导致潜在侵蚀量更高), 但是产水服务变化趋势不确定, 最终带来 1 型权衡趋势的波动性。草地比例对 1 型权衡表现为波动增加的趋势, 草地往往具有较强的土壤保持与产水能力, 虽然总体趋势表现为其更有利于土壤保持, 但是该趋势仍然存在扰动。

年均气温、年降水量、坡度、林地比例等因素对 2 型土壤保持-产水权衡的影响较大并达到显著水平。以 8 °C 和 10 °C 为临界点, 年均气温对 2 型土壤保持-产水权衡的影响表现为“缓慢抑制—快速抑制—促进”的趋势 (见图 13), 说明气温的主导作用为通过蒸散发降低产水服务, 其次是通过植被覆盖等其他途径增加土壤保持服务。年降水量在 620 mm 以下时抑制权衡, 说明降水对土壤保持的促进作用占主导, 但处于该趋势范围的散点较少 (平滑线较短); 年降水量超过 620 mm 后则加剧权衡强度, 降水对产水服务的直接促进作用成为主导趋势 (平滑线较长)。坡度处于



图 11 主导因素对 2 型固碳-产水权衡的非线性作用

Fig.11 Nonlinear effects of dominant factors on the type 2 carbon sequestration-water yield trade-off

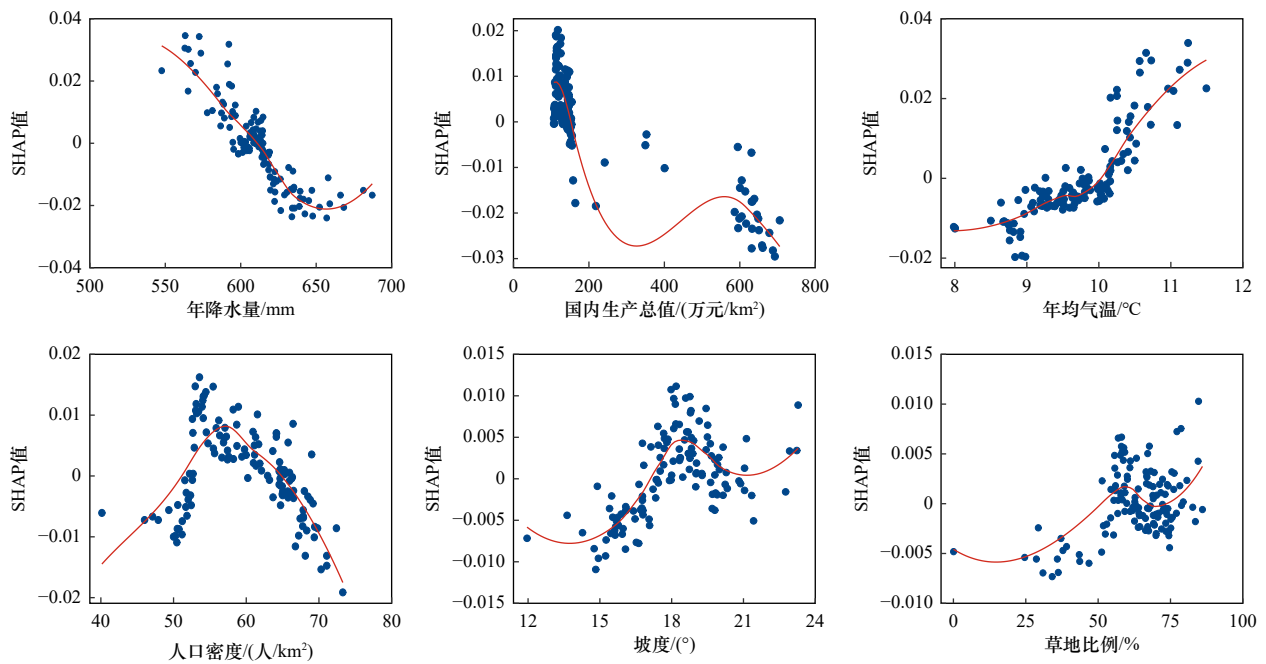


图 12 主导因素对 1 型土壤保持-产水权衡的非线性作用

Fig.12 Nonlinear effects of dominant factors on the type 1 soil conservation-water yield trade-off

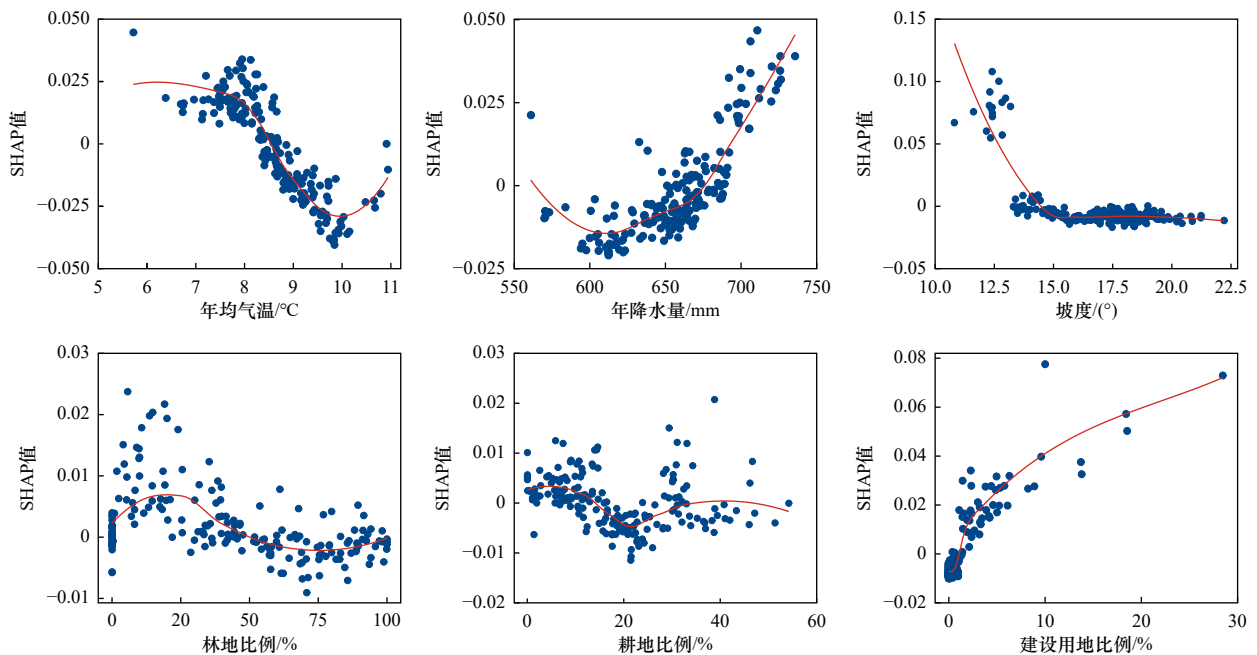


图 13 主导因素对 2 型土壤保持-产水权衡的非线性作用

Fig.13 Nonlinear effects of dominant factors on the type 2 soil conservation-water yield trade-off

15°以下时表现为抑制权衡强度,这是坡度增加促进土壤保持所致;坡度超过 15°后平滑线趋于平直,说明植被、气候、人类活动等其他因素的作用较强,坡度对权衡的影响微弱。林地比例对权衡影响的大趋势为轻度抑制权衡,原因是林地能够降低产水并提升土壤保持能力。耕地比例以 20% 为临界点分为抑制与促进权衡两个阶段,但是散点分布并不集中在平滑

线附近,说明耕地的作用存在不确定性。建设用地产水作用强,因此其主要表现为促进权衡。

3 讨论

3.1 生态系统服务及其权衡时空演变方向的不确定性与波动性

生态系统服务及其权衡受自然因素与社会经济因素的共同影响,尽管其作用过程十分复杂,但主导

因素控制下的生态系统服务及其权衡的时空演变方向往往具有一定的确定性与波动性。本研究发现2000—2015年期间昕水河流域固碳与土壤保持服务升高而产水服务下降,这是退耕还林、水土保持工程等生态修复活动带来的确定性趋势,土地利用变化是驱动该过程的主导因素。诸多对黄土高原的研究都发现了这一规律,植被生长与蒸散耗水是对立统一的整体,植被的水资源承载力成为黄土高原生态建设的重要议题^[4,17,23,29-30]。2020年偏高的降水量引起土壤保持与产水服务明显增加,在既有演变方向上出现波动,已有研究在地理空间相邻的汾河流域发现了相同的结果^[3],说明降水对土壤保持及产水服务的重要作用^[31-32]。固碳服务呈东高西低的空间格局,20年来高值区向低值区稳定扩张;土壤保持服务的空间格局在2000—2015年亦相对稳定,但2020年高值区扩大并占据流域大部分空间;产水服务的空间格局不确定,降水波动增加了其空间分异。因此,地形地貌背景、生态恢复活动、降水变化共同导致了昕水河流域生态系统服务及其权衡演变的确定性与波动性,黄河中游的汾河流域^[3]、延河流域^[33]、渭河流域^[34]均存在相似特征。

3.2 生态系统服务权衡类型识别的必要性

从时空分异角度看,20年间1型固碳-产水权衡强度高于2型权衡,二者均呈增加趋势,并且2型权衡的增加率远高于1型权衡。这说明无论固碳占优还是产水占优均出现增强态势,生态系统服务在固碳与产水之间出现了两极分化。同时,1型土壤保持-产水权衡强度往往高于2型权衡,20年间1型与2型土壤保持-产水权衡分别呈现下降与上升的趋势,最终两类权衡强度趋于相同。若不区分权衡类型将无法识别这一规律,如已有研究在黄土高原地区也发现权衡强度的时间趋势^[4,35-36],但这是两类权衡混杂合并的结果。1型与2型权衡的空间差异更为明显:1型固碳-产水权衡高值区主要位于流域东部边缘和南部地区,而2型权衡高值区则分布于流域西北部;1型土壤保持-产水权衡高值分布于流域中部和西部地区,2型权衡高值区主要位于流域北部、东部和南部的边缘地带。这是固碳-产水关系、土壤保持-产水关系在驱动因素控制下产生的结果,权衡类型的区分不仅有助于识别1型和2型权衡的主导区域,也发现了固碳-产水权衡与土壤保持-产水权衡空间格局的显著差异,这为不同生态系统服务关系在地理空间上的差异化管理提供了关键信息。已有研究对山西省^[37]、钱江源国家公园^[38]的生态系统服务权衡关系进行了

类型识别,与本研究具有相似之处。

从生态系统服务权衡与驱动因素的关系网络来看,两类权衡的偏相关网络存在一定差异,指示了二者存在不同的驱动过程:1型固碳-产水权衡主要受林地与耕地比例及年降水量控制,而2型权衡主要受林地与建设用地比例及年均气温影响;1型土壤保持-产水权衡主要受年降水量影响,而2型权衡主要受建设用地比例与林地比例、年降水量与年均气温控制,并且其网络结构较1型权衡复杂。同时,1型固碳-产水权衡与1型土壤保持-产水权衡的偏相关网络存在差异,但2型权衡之间的网络结构相似。上述发现均说明区分权衡类型有助于更精细地阐释生态系统服务权衡的关系网络。但是基于偏相关网络的生态系统服务权衡研究较少,目前尚无法对比分析。

从非线性驱动特征看,固碳-产水权衡方面,林地比例对1型权衡表现为促进作用,但其对2型权衡以抑制作用为主;年降水量与草地比例对1型权衡呈非线性抑制作用,但其对2型权衡呈先促进后抑制的作用;年均气温对两类权衡的作用曲线分别呈开口向上与向下的抛物线形。土壤保持-产水权衡方面,降水对1型与2型权衡分别呈抑制与促进为主导的趋势;年均气温对两类权衡的作用分别表现为促进与抑制为主导的趋势;1型权衡随坡度表现为波动增加的趋势,但2型权衡随坡度呈先快速降低后稳定的趋势。可见,1型权衡与2型权衡具有不同的生态学意义,主导因素的驱动方向存在差异甚至完全相反,不区分权衡类型,将无法精确揭示权衡机制。已有研究在黄土高原中部发现权衡主要受土地利用与气候因素影响^[4,17,36],尽管该结果与本研究相似,但未能识别两项生态系统服务此消彼长的方向,难以提出抑制权衡的差异化调控措施。也有研究在识别权衡类型后发现两类权衡的驱动特征不同^[3],与本研究结果能够相互印证。

3.3 整合偏相关网络与SHAP依赖图是解析生态系统服务权衡机制的新途径

偏相关网络方法对解析复杂系统中多变量间的条件依赖关系具有优势,有学者将其应用于生态系统服务研究,证实该方法能够突破传统时空分析的局限,深入挖掘生态系统服务对社会-生态因素的依赖与反馈机制^[19]。偏相关网络方法能降低虚假相关干扰,提升网络估计的稳健性^[39]。本研究基于该方法构建了生态系统服务权衡与驱动因素的关系网络,清晰呈现了权衡的直接与间接驱动因素及驱动因素之间的关联,并且识别了能够调控网络结构的关键节点。

本研究发现土地利用、降水与气温等因素往往成为影响权衡的主导因素,并且这些因素的节点强度也比较高。Wang等^[19]构建了黄土高原生态系统服务网络,认为造林面积百分比与碳固存及土壤保持呈正相关,与笔者研究结果具有相似之处。Wang等^[19]也发现kNDVI(核归一化植被指数)趋势的节点强度最高,在网络中具有至关重要的影响力,但是笔者发现植被指数的节点强度仅能排在第8~10位,这说明生态系统服务网络与权衡网络存在较大差异。总之,偏相关网络在展示生态系统服务权衡与驱动因素的整体关联结构方面具有优势,相关研究还相对缺乏,未来应强化网络结构时间演变与因果机制研究。

SHAP依赖图基于合作博弈论中的沙普利值概念,能直观展示单个特征对模型预测结果的影响,现已成为非线性研究的前沿方法。已有研究基于SHAP依赖图、约束线、分段回归等方法发现影响因素对生态系统服务本身、服务间权衡、服务供需比均表现为非线性驱动特征^[12,21,40]。这说明生态系统服务之间及其与环境因素之间共同组成了复杂的非线性系统,传统的线性回归、冗余分析、主成分分析均难以解析其非线性规律。在此背景下,本研究基于SHAP依赖图发现土地利用、降水、气温、坡度等因素对生态系统服务权衡均存在影响阈值。已有研究基于随机森林模型的偏依赖图分析了汾河流域两类权衡的驱动机制^[3],其中林地比例与降水量对1型与2型固碳-产水权衡的影响趋势与笔者研究结果相同,但年均气温的影响趋势与笔者研究结果差异较大,一方面说明相近地理空间的权衡驱动机制具有相似性,另一方面也说明不同空间尺度权衡规律的迁移需谨慎。总之,这些非线性驱动特征清晰地展示了生态系统权衡发生突变的临界点,为实施差异化的管理干预、实现生态治理的精准施策提供了关键的决策支撑。

综上,偏相关网络擅长呈现生态系统服务权衡与驱动因素的整体关联特征,能够从宏观视角展现服务权衡与社会生态因子的相互作用规律;SHAP依赖图则能揭示变量的非线性驱动特征及阈值点,实现权衡规律的精细探查。如果单一使用偏相关网络则仅能刻画变量间依赖结构,无法量化驱动因素的临界阈值,导致知整体而不知细节的管理困境;而仅使用SHAP依赖图则局限于孤立分析单因子效应,难以揭示多因子互动下的系统反馈,陷入知细节而不知全局的认知偏差。因此,两类方法的整合能够同时揭示复杂系统的宏观与局部特征,突破单一方法局限,成为全面解析生态系统服务权衡机制的新途径。

3.4 局限性分析

本研究虽然系统解析了昕水河流域生态系统服务权衡机制,但仍存在一定局限:①InVEST模型模拟结果受输入数据精度与参数本地化程度影响,土壤属性、生物物理参数等数据的不确定性可能传导至生态系统服务计算。②驱动因素选择受数据可获得性的限制,未纳入农业管理与水土保持及政策实施强度等因素,可能影响驱动机制解析的完整性。③针对生态系统服务权衡强度的界限标准,未来应整合植被水资源承载力与生态系统服务供需关系综合确定。④生态系统服务外溢会改变周边的权衡状态,未来应将生态系统服务流纳入权衡研究。

4 结论

a) 2000—2020年昕水河流域1型固碳-产水权衡强度高于2型权衡,二者均呈上升趋势;1型权衡高值区主要分布于流域东部边缘和南部地区,2型权衡高值区则分布于流域西北部;2020年1型权衡在空间上占主导的趋势被逆转,2型权衡开始从西北部向南扩张。1型与2型土壤保持-产水权衡分别呈波动下降与上升趋势,导致权衡强度从1型权衡较高演变为两类权衡强度趋于相同;1型权衡高值区主要位于流域中部和西部地区,2型权衡高值区位于流域北部、东部和南部边缘;1型权衡在空间上往往处于主导地位,但2020年其强度下降且面积缩小。

b) 偏相关网络展现了权衡与驱动因素的整体关联特征,1型固碳-产水权衡与林地、耕地比例及年降水量分别表现为正相关、负相关及负相关,2型权衡与林地比例、年均气温呈负相关、与建设用地比例呈正相关。1型土壤保持-产水权衡与年降水量呈负相关,2型权衡与年降水量及建设用地比例均呈正相关,与年均气温及林地比例均呈负相关。1型固碳-产水权衡与1型土壤保持-产水权衡的偏相关网络存在差异,但2型权衡之间的网络结构相似,为权衡联合调控提供了依据。土地利用类型、年降水量、人口密度等因素具有较高的节点强度,成为生态系统服务权衡网络调控的关键节点。

c) 林地比例为25%~75%时对1型固碳-产水权衡的促进作用最强,超过75%后其作用减弱;年降水量超过680mm时显著抑制权衡;耕地、草地因较低的蒸散作用而抑制权衡。建设用地因其低固碳、低蒸散特性而持续强化2型固碳-产水权衡;2型权衡对耕地比例、林草地比例、年均气温与年降水量的非线性响应方向与1型权衡不同,凸显了两类权衡的生态学差异。1型土壤保持-产水权衡随年降水量的升

高而降低,年降水量超过 650 mm 后趋势逆转;国内生产总值升高使权衡波动下降。年均气温以 8 ℃ 和 10 ℃ 为临界点,对 2 型土壤保持-产水权衡的影响表现为“缓慢抑制—快速抑制—促进”的三阶段特征;年降水量超过 620 mm 后由抑制权衡转为加剧权衡。总之,类型识别是权衡分析的必要基础,偏相关网络与 SHAP 依赖图揭示了复杂系统的宏观与局部特征,成为全面解析生态系统服务权衡机制的新途径。

参考文献 (References):

- [1] COSTANZA R,D'ARGE R,de GROOT R,et al.The value of the world's ecosystem services and natural capital[J].Ecological Economics,1998,25(1):3-15.
- [2] BENNETT E M,PETERSON G D,GORDON L J.Understanding relationships among multiple ecosystem services[J].Ecology Letters,2009,12(12):1394-1404.
- [3] 冯强,赵文武,王晶,等.类型识别视角下汾河流域生态系统服务权衡时空分异及非线性驱动特征 [J].生态学报,2025,45(16):7921-7937.
- FENG Q,ZHAO W W,WANG J,et al.Spatio-temporal variability and nonlinear driving characteristics of ecosystem services trade-offs from the perspective of type identification in Fenhe River Basin[J].Acta Ecologica Sinica,2025,45(16):7921-7937.
- [4] FENG Q,ZHAO W W,HU X P,et al.Trading-off ecosystem services for better ecological restoration:a case study in the Loess Plateau of China[J].Journal of Cleaner Production,2020,257:120469.
- [5] 裴夏,于倩茹,刘春兰,等.北京市生态系统调节服务稀缺性演变特征及驱动因素分析 [J].环境科学研究,2025,38(1):111-124.
- PEI S,YU Q R,LIU C L,et al.Evolutionary characteristics and driving factors of the scarcity of urban ecosystem regulating services in Beijing[J].Research of Environmental Sciences,2025,38(1):111-124.
- [6] 田文涛,都沁军.河北省生态系统服务权衡协同关系评估与预测 [J].环境科学,2025,46(10):6378-6392.
- TIAN W T,DU Q J.Assessment and prediction of trade-offs and synergies of ecosystem services in Hebei Province[J].Environmental Science,2025,46(10):6378-6392.
- [7] LI J X,ZHAO W W,MA X F,et al.Ecosystem service tradeoff and synergy mechanisms in the Central Asian terminal lake basin based on Bayesian Networks[J].Ecosystem Services,2025,75:101768.
- [8] CAO A H,ZHANG J N.Multi-scenario prediction of ecosystem services value and mechanism of its trade-offs under the township scale:evidence from Liaoning Province[J].Environmental Monitoring and Assessment,2025,197(2):204.
- [9] 李倩茹,贾彦龙,王慧军,等.基于生态功能区的河北省生态系统服务权衡与协同分析 [J].地理学报,2023,78(11):2833-2849.
- LI Q R,JIA Y L,WANG H J,et al.Analysis of trade-off and synergy effects of ecosystem services in Hebei Province from the perspective of ecological function area[J].Acta Geographica Sinica,2023,78(11):2833-2849.
- [10] 陶洁怡,章锦河,董平,等.耕地生态系统服务权衡/协同关系及驱动因素阈值效应:以长三角地区为例 [J].生态学报,2025,45(16):7836-7851.
- TAO J Y,ZHANG J H,DONG P,et al.Cropland ecosystem service trade-offs/synergies and threshold effects:a case study of the Yangtze River Delta region[J].Acta Ecologica Sinica,2025,45(16):7836-7851.
- [11] TAN J,PENG L,WU W X,et al.Exploring the evolution and trade-off within a socio-ecological system in karst regions:a case study of Huanjiang County,China[J].Geography and Sustainability,2025,6(3):100256.
- [12] FENG Q,DONG S Y,DUAN B L,et al.The effects of land-use change/conversion on trade-offs of ecosystem services in three precipitation zones[J].Sustainability,2021,13(23):13306.
- [13] LI Z H,DENG X Z,JIN G,et al.Tradeoffs between agricultural production and ecosystem services:a case study in Zhangye, Northwest China[J].Science of the Total Environment,2020,707:136032.
- [14] BURGOS-AYALA A,JIMÉNEZ-ACEITUNO A,MEACHAM M, et al.Mapping ecosystem services in Colombia:analysis of synergies,trade-offs and bundles in environmental management [J].Ecosystem Services,2024,66:101608.
- [15] CHEN D X,WANG Y M,BAO H J.Sharing or sparing?the trade-offs among urban services,food production and ecosystem services [J].Habitat International,2024,147:103037.
- [16] SEGURA-BARRERO R,LANGEMEYER J,BADIA A,et al.The food-water-climate nexus of green infrastructure:examining ecosystem services trade-offs of peri-urban agriculture [J].Science of the Total Environment,2024,951:175799.
- [17] FENG Q,DUAN B L,ZHANG X,et al.Relationship between ecosystem-services trade-offs and supply-demand balance along a precipitation gradient:a case study in the central Loess Plateau of China[J].Land,2024,13(7):1057.
- [18] ZHANG L,LEI J R,CHEN Z Z,et al.Spatiotemporal differentiation and trade-offs and synergies of ecosystem services in tropical island basins:a case study of three major basins of Hainan Island [J].Journal of Cleaner Production,2025,490:144798.
- [19] WANG Z Z,FU B J,WU X T,et al.Exploring the interdependencies of ecosystem services and social-ecological factors on the Loess Plateau through network analysis[J].Science of the Total Environment,2025,960:178362.
- [20] LUNDBERG S M,LEE S I A unified approach to interpreting model predictions [C].Long Beach,California,USA:proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems,2017:4768-4777.
- [21] 段宝玲,冯强,王晶,等.汾河流域生态系统服务供需风险量化评估及其影响阈值 [J].干旱区研究,2025,42(9):1726-1741.
- DUAN B L,FENG Q,WANG J,et al.The supply-demand risks of ecosystem services and threshold characteristics of their

- influencing factors in Fenhe River Basin[J]. *Arid Zone Research*, 2025,42(9):1726-1741.
- [22] 赵兴赞,张强,杨方社,等.基于 XGBoost-SHAP 方法的陕西省 PM_{2.5} 影响因素分析 [J]. *环境科学研究*,2025,38(5):990-999.
ZHAO X Y,ZHANG Q,YANG F S,et al. Analysis of influencing factors of PM_{2.5} in Shaanxi Province based on XGBoost-SHAP method[J]. *Research of Environmental Sciences*,2025,38(5):990-999.
- [23] 曲绅豪,周文婷,张翔,等.黄河中游典型流域近 60 年水沙变化趋势及影响因素 [J]. *水土保持学报*,2023,37(3):35-42.
QU S H,ZHOU W T,ZHANG X,et al. Variation trend and influencing factors of water and sediment in the middle reaches of the Yellow River in recent 60 years[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*,2023,37(3):35-42.
- [24] 谢晨新,张守红,李华林,等.1987—2020 年昕水河流域土地利用变化对碳储量的影响 [J]. *生态学报*,2024,44(18):8021-8032.
XIE C X,ZHANG S H,LI H L,et al. Impact of land use change on carbon storage in Xinshui River Basin from 1987 to 2020[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2024,44(18):8021-8032.
- [25] 宋克鹏,李一帆,曲思仪,等.黄土高原沟壑区典型流域不同算法土壤侵蚀集成模拟比较 [J]. *中国水土保持科学(中英文)*,2024,22(2):81-89.
SONG K P,LI Y F,QU S Y,et al. Ensemble simulation for soil erosion of a typical watershed in the Gully Region of Loess Plateau on the basis of different algorithms[J]. *Science of Soil and Water Conservation*,2024,22(2):81-89.
- [26] 国家发展和改革委员会,国家统计局.生态产品总值核算规范 [M].北京:人民出版社,2022.
- [27] BRADFORD J B,D'AMATO A W. Recognizing trade-offs in multi-objective land management[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*,2012,10(4):210-216.
- [28] EPSKAMP S,FRIED E I. A tutorial on regularized partial correlation networks[J]. *Psychological Methods*,2018,23(4):617-634.
- [29] GOU F,LIANG W,FU B J,et al. Regional variations in vegetation greening and climate change impacts on gross primary productivity and evapotranspiration in the Loess Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*,2025,373:110757.
- [30] YI H J,ZHANG X P,HE L,et al. Detecting the impact of the 'Grain for Green' program on land use/land cover and hydrological regimes in a watershed of the Chinese Loess Plateau over the next 30 years[J]. *Ecological Indicators*,2023,150:110181.
- [31] 万志纲,丁文广,蒲晓婷,等.祁连山国家公园产水量时空变化及驱动因素分析 [J]. *水土保持学报*,2023,37(6):161-169.
WAN Z G,DING W G,PU X T,et al. Analysis of the spatial-temporal variation and driving factors of water yield in Qilian Mountain National Park[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*,2023,37(6):161-169.
- [32] CHEN L,WEI W,TONG B,et al. Ecosystem services and their drivers under different watershed management patterns in the western Chinese Loess Plateau[J]. *Ecological Indicators*,2025,172:113321.
- [33] 何佳瑛,蒋晓辉,雷宇昕.黄土高原生态工程对关键生态系统服务时空变化的影响:以延河流域为例 [J]. *生态学报*,2023,43(12):4823-4834.
HE J Y,JIANG X H,LEI Y X. Effects of ecological engineering on spatio-temporal changes of key ecosystem services on the Loess Plateau: a case study in the Yanhe River Basin, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2023,43(12):4823-4834.
- [34] 徐省超,赵雪雁,宋晓谕.退耕还林(草)工程对渭河流域生态系统服务的影响 [J]. *应用生态学报*,2021,32(11):3893-3904.
XU X C,ZHAO X Y,SONG X Y. Impacts of the returning farmland to forest (grassland) project on ecosystem services in the Weihe River Basin, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021,32(11):3893-3904.
- [35] 黄学煜,修丽娜,陆志翔.陇东黄土高原生态系统服务权衡效应及其驱动因素 [J]. *干旱区地理*,2025,48(3):480-493.
HUANG X Y,XIU L N,LU Z X. Effects and driving factors of ecosystem service trade-offs in the Longdong Loess Plateau, China [J]. *Arid Land Geography*,2025,48(3):480-493.
- [36] 徐铭璟,冯强,吕萌.生态系统服务权衡及其影响因素:以黄河流域山西段为例 [J]. *干旱区研究*,2024,41(3):467-479.
XU M J,FENG Q,LYU M. Tradeoffs of ecosystem services and their influencing factors: a case study of the Shanxi Section of the Yellow River Basin[J]. *Arid Zone Research*,2024,41(3):467-479.
- [37] 冯强,赵文武,段宝玲.生态系统服务权衡强度与供需匹配度的关联性分析:以山西省为例 [J]. *干旱区研究*,2022,39(4):1222-1233.
FENG Q,ZHAO W W,DUAN B L. Relationship between trade-off intensity of ecosystem services and matching degree of supply and demand: a case study in Shanxi Province[J]. *Arid Zone Research*, 2022,39(4):1222-1233.
- [38] 段宝玲,冯强,原燕燕,等.钱江源国家公园体制试点区生态系统服务权衡与协同分析 [J]. *旅游科学*,2021,35(5):11-31.
DUAN B L,FENG Q,YUAN Y Y,et al. Ecosystem services trade-offs and synergies in Qianjiangyuan National Park system pilot[J]. *Tourism Science*,2021,35(5):11-31.
- [39] EPSKAMP S,BORSBOOM D,FRIED E I. Estimating psychological networks and their accuracy: a tutorial paper[J]. *Behavior Research Methods*,2018,50(1):195-212.
- [40] LUO K,WANG H W,YAN X M,et al. Study on trade-offs and synergies of rural ecosystem services in the Tacheng-Emin Basin, Xinjiang, China: implications for zoning management of rural ecological functions[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024,363:121411.

(责任编辑:周巧富)