

DOI: 10.20103/j.stxb.202501100087

冯强, 赵文武, 王晶, 段宝玲. 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. 生态学报, 2025, 45(16): 7921-7937.

Feng Q, Zhao W W, Wang J, Duan B L. Spatio-temporal variability and nonlinear driving characteristics of ecosystem services trade-offs from the perspective of type identification in Fenhe River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(16): 7921-7937.

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

冯 强¹, 赵文武^{2,*}, 王 晶³, 段宝玲¹

1 山西财经大学资源环境学院, 太原 030006

2 北京师范大学地理科学学部地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

3 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:厘清生态系统服务权衡机制对支撑流域生态保护与可持续发展具有重要意义。提出权衡类型识别方法, 利用 InVEST 模型与机器学习等方法, 分析了汾河流域 2000—2020 年固碳、产水与土壤保持服务及其权衡的时空分异与非线性驱动特征。结果表明: ①除平原区外 1 型固碳-产水服务权衡持续增加但 2020 年突然下降, 山地区 2 型固碳-产水服务权衡在 20 年间变化不大, 但是平原区、台地区与梁峁区的时间趋势各异。地貌区之间 1 型土壤保持-产水服务权衡的时间趋势不一致, 2 型土壤保持-产水服务权衡相对稳定但 2020 年大幅增加。②2000—2015 年 1 型固碳-产水服务权衡的空间范围逐渐扩大但 2 型权衡相对萎缩, 该趋势于 2020 年逆转。2000—2015 年 1 型和 2 型土壤保持-产水权衡分布位置相对稳定, 但 2020 年演变为 2 型权衡处于主导的空间格局。③土地利用、降水、坡度等因素对 1 型或 2 型权衡的影响均存在阈值效应。林地与降水、建设用地与降水、耕地与坡度之间的交互效应往往存在明显的趋势特征, 交互效应散点图提供了丰富的双因子驱动特征信息, 对指导不同气候资源及地形条件下的土地利用配置具有参考价值。本研究为权衡机制这类“黑箱”系统提供了更丰富的观察视角, 有望更全面的支撑生态保护修复实践。

关键词:生态系统服务权衡; 时空分异; 驱动机制; 沙普利加性解释; 汾河流域

Spatio-temporal variability and nonlinear driving characteristics of ecosystem services trade-offs from the perspective of type identification in Fenhe River Basin

FENG Qiang¹, ZHAO Wenwu^{2,*}, WANG Jing³, DUAN Baoling¹

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

2 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

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

Abstract: The Fenhe River Basin is a critical ecological zone in the middle reaches of the Yellow River, which has been featured by both fragile ecosystem and intensive human activities. It is of great significance to clarify the trade-off mechanism of ecosystem services (ESs) to support the ecological protection and sustainable development. This study innovatively categorized the types of ESs trade-off based on comparative advantages, and investigated the spatio-temporal patterns and nonlinear drivers of trade-offs among carbon sequestration (CAS), water yield (WAY), and soil conservation (SOC) from 2000 to 2020 through Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs (InVEST) model as well as Random Forest

基金项目:国家自然科学基金(42271292);教育部人文社会科学研究规划项目(22YJAZH018)

收稿日期:2025-01-10; **采用日期:**2025-07-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaoww@bnu.edu.cn

model and Shapley Additive Explanations (SHAP). The results showed that: (1) CAS and SOC showed a continuous increasing trend from 2000 to 2020, while WAY decreased slightly before a significant increase in 2020. Type 1 CAS-WAY trade-offs exhibited a steady rise across most regions except the plain area, where they suddenly decreased in 2020. Type 2 CAS-WAY trade-offs in mountain area remained relatively stable over two decades, though temporal trends varied among the plain, platform, and hilly areas. The temporal trend of the type 1 CAS-SOC trade-offs differed across geomorphological zones, while the type 2 CAS-SOC trade-offs were stable but experienced a sharp increase in 2020. (2) From 2000 to 2015, the spatial extent of type 1 CAS-WAY trade-offs gradually expanded, whereas type 2 trade-offs underwent a relative contraction, this trend then reversed in 2020. The spatial distribution of both type 1 and type 2 CAS-SOC trade-offs were stable from 2000 to 2015 but shifted into a spatial pattern where type 2 trade-offs dominated in 2020. (3) Factors such as land use, precipitation, slope gradient, temperature exhibited threshold effects on both type 1 and type 2 trade-offs, which were the results of the comprehensive interactions among multiple factors. The interaction effects between forest cover and precipitation, construction land and precipitation, cropland and slope gradient showed distinct trends. For example, at a lower forest cover proportion, even with lower precipitation, the trade-off of type 1 CAS-WAY can still be mitigated. As the forest cover proportion increased, the interaction effect exhibited two distinct patterns: below 700 mm of precipitation, the trade-off was enhanced, while above 700 mm of precipitation, the trade-off was declined. The interaction effects offered critical insights for guiding land use allocation strategies under diverse climatic and topographic conditions. This study enriches the understanding of the “black box” trade-off mechanism, and is expected to comprehensively support the practice of ecological protection and restoration.

Key Words: ecosystem services trade-offs; spatio-temporal differentiation; driving mechanism; Shapley additive interpretation (SHAP); Fenhe River Basin

生态系统服务是指人类直接或者间接从生态系统得到的所有收益,包括供给服务、调节服务、支持服务和文化服务四大类,其目标终点是人类福祉的提升^[1]。生态系统服务权衡是指一种生态系统服务供给水平的增强以降低其他生态系统服务的供给为代价,即不同生态系统服务之间存在此消彼长的关系^[2]。生态系统服务受地形、土壤、气候、土地利用、人口密度等自然与社会经济因素影响,诸多因素对不同生态系统服务的驱动机制存在差异,导致生态系统服务变化的数量与方向不同,因此出现权衡现象^[3]。目前,人类的选择偏好已经成为生态系统服务权衡的重要外因,例如农田这种半人工生态系统最大化的获取了粮食供给服务但减弱了土壤保持等调节服务,干旱/半干旱地区的植被恢复活动增加了固碳与土壤保持服务但降低了产水服务。尽管权衡理论已经证实生态系统很难同时最大化的提供各项服务,但是权衡研究有利于深入解析各项生态系统服务关系,这为疏解生态系统服务冲突提供了可行途径。因此,生态系统服务权衡研究成为生态环境管理的重要依据^[4-6]。

权衡分析已经从定性识别走向定量研究,来自地理学、统计学、计量经济学等多学科的定量方法被生态系统服务研究者引入,出现了大量的权衡量化指标与分析方法。相关系数和均方根误差可以简单而有效的量化生态系统服务权衡强度^[7]。自组织特征映射网络、聚类分析与主成分分析将多重生态系统服务分成若干“生态系统服务簇”,再进行关系识别与量化^[8]。生产可能边界用机会成本的思想计算权衡强度^[9]。贝叶斯网络模型是一个有力的权衡分析工具,具有集成专家知识到模型过程和解释不确定性的能力^[10]。双变量局部莫兰指数、定向距离函数、有序加权平均算子、多元回归树也在权衡分析中发挥各自的优势^[11-12]。总之,基于不同的权衡研究目的,多学科的定量与优化方法充分发挥各自优势,并在研究中整合与拓展。然而,已有研究很少根据两项生态系统服务此消彼长的方向区分权衡类型,例如退耕还林带来固碳增加而产水服务下降属于一类权衡,森林砍伐带来固碳降低但产水服务增加属于另一类权衡,仅通过权衡强度数值的大小难以反映真实的生态过程。因此,有必要根据此消彼长或此长彼消的方向识别权衡类型,这将为权衡研究提供双向视角,有

望更为精细的解析权衡的时空格局。

厘清生态系统服务权衡的驱动机制是社会-生态系统综合管理的依据,近年来驱动机制研究发展较快。学者们利用相关分析、分位数回归、分段线性回归、地理加权回归、冗余分析、地理探测器、随机森林模型、极限梯度提升树等方法,识别了权衡的主导因素与阈值^[13-15]。不同领域的归因方法尤其是机器学习算法开始大量应用于权衡驱动机制研究,但是大多数机器学习算法属于黑箱模型,难以深入阐释权衡的驱动机制。偏依赖分析可以洞察已训练机器学习模型中隐含的复杂非线性关系,对于揭示驱动变量的阈值效应具有优势。同时,Lundberg 等^[16]提出的沙普利加性解释(SHAP)方法可以进一步解释各种黑箱模型,其在刻画双变量交互作用方面具有独特的优势。因此,有必要耦合随机森林模型、偏依赖分析与沙普利加性解释方法,系统解析权衡的驱动机制。

汾河流域地处黄土高原东部,是山西省工农业集中的重要区域。汾河流域具有生态脆弱与人类活动密集的双重特征,产水、土壤保持与固碳等典型生态系统服务是支撑流域高质量发展的重要保障。但是汾河流域的生态系统服务研究尚不深入,已有研究多关注时空分异、格局优化与情景模拟等方面^[17-19],对权衡驱动机制的研究相对缺乏。因此,本研究以 2000—2020 为研究期限,识别两种权衡类型,利用 InVEST 模型与机器学习方法,试图回答如下问题:(1)在类型识别视角下生态系统服务权衡呈现怎样的时空格局?(2)驱动因素对权衡强度的影响阈值与交互效应如何?本研究将为生态系统服务调控提供更为全面的理论依据,支撑流域生态保护修复实践。

1 研究方法

1.1 研究区概况

汾河是黄河的第二大支流,流经太原、晋中、临汾等 6 个地区,被誉为山西的“母亲河”。汾河流域位于山西省的中南部,约占全省总面积的 25%,养育了全省 41%的人口。汾河流域西临吕梁山、东靠太行山,地貌复杂多样。按照中国 1:400 万地貌图(形态)可以将汾河流域地貌归纳为 4 大类:平原、台地、丘陵和山地(图 1)。汾河流域位于温带大陆性半干旱、半湿润季风气候区,四季分明,降雨集中,水土流失严重。汾河流域的土地利用依赖于地貌条件,耕地和建设用地主要分布在平原和台地、林草地主要分布在丘陵和山地。

1.2 数据来源

汾河流域土地利用数据(30m×30m)、净初级生产力(NPP)(1km×1km)、人口密度(1km×1km)和国内生产总值(GDP)(1km×1km)数据通过中国科学院资源环境科学与数据中心下载(<https://www.resdc.cn/>);数字高程模型(DEM)(30m×30m)数据通过地理空间数据云获取(<https://www.gscloud.cn>)。土壤(1km×1km)、降水(1km×1km)和蒸散发(1km×1km)及归一化植被指数(NDVI)数据(1km×1km)来自国家地球系统科学数据中心(<https://www.geodata.cn>)。

1.3 生态系统服务评估

1.3.1 产水服务

InVEST 模型的产水模块通过降水量与实际蒸散发的差值表示产水服务。

$$Y_{xj} = (1 - \frac{AET_{xj}}{P_x})P_x \quad (1)$$

式中: Y_{xj} 为栅格单元 x 中土地利用类型 j 的年产水量; AET_{xj} 为栅格单元 x 中土地利用类型 j 的实际蒸散发; P_x 为栅格单元 x 的降水量。 AET_{xj}/P_x 利用 Budyko 水热耦合平衡算法计算^[20]。

1.3.2 土壤保持服务

土壤保持服务通过 InVEST 模型的土壤保持模块计算。

$$SC_x = (SEP_x - SEA_x) \times SDR_x + T_x \quad (2)$$

$$SEP_x = R_x \times K_x \times LS_x \quad (3)$$

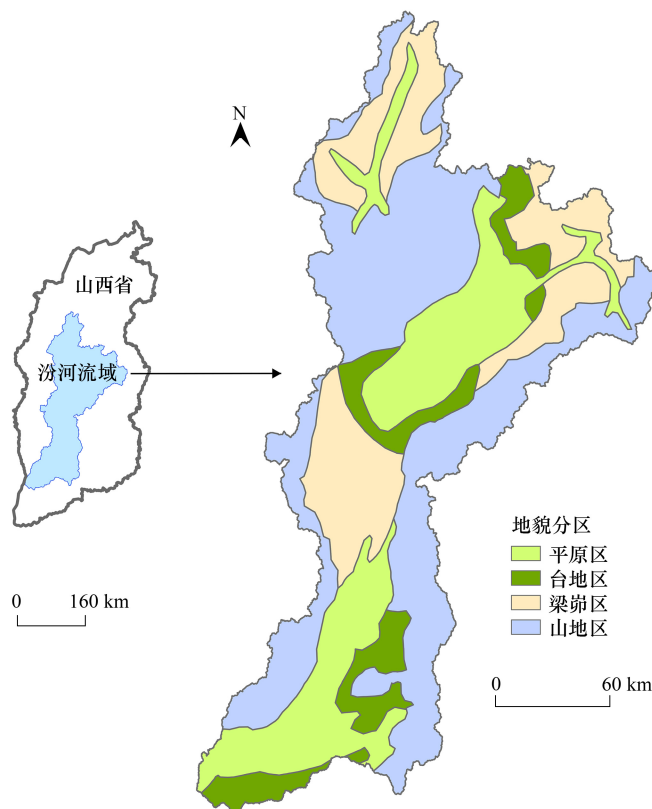


图1 汾河流域位置与地貌分区图

Fig.1 Location and geomorphic zoning map of Fenhe river basin

$$SEA_x = R_x \times K_x \times LS_x \times C_x \times P_x \quad (4)$$

式中: SC_x 为栅格单元 x 的土壤保持量; SEP_x 为栅格单元 x 的潜在土壤侵蚀量; SEA_x 为实际土壤侵蚀量; SDR_x 为泥沙输移比; T_x 为对上坡流出泥沙的拦截量; R_x 为降雨侵蚀力因子; K_x 为土壤可蚀性因子; LS_x 为地形因子; C_x 为植被覆盖与管理因子; P_x 为水土保持措施因子。

1.3.3 固碳服务

固碳服务通过净生态系统生产力 (NEP) 表示, 按照《生态产品总值核算规范》推荐的方法和参数计算^[21]。

$$NEP = \alpha \times NPP \quad (5)$$

式中: NPP 为净初级生产力, α 为 NEP 和 NPP 的转换系数。

1.4 生态系统服务权衡的类型识别与计算

本研究采用均方根偏差法计算权衡强度^[22], 该方法不仅能计算两项生态系统服务反向变化程度, 也能刻画同向变化但变幅不一致的程度。

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (ES_i - \overline{ES})^2} \quad (6)$$

式中: $RMSD$ 为权衡强度; ES_i 为某一生态系统服务标准化值; $\overline{ES}$ 为某一生态系统服务的数学期望。

已有研究发现黄土高原地区产水与固碳服务、产水与土壤保持服务之间多表现为权衡关系^[23]。本研究提出根据消长方向识别权衡类型的研究视角, 固碳服务相对占优识别为 1 型固碳-产水服务权衡, 土壤保持服务相对占优识别为 1 型土壤保持-产水服务权衡, 反之, 产水服务占优的情况分别识别为 2 型固碳-产水服务权衡和 2 型土壤保持-产水服务权衡。均方根偏差法计算的权衡强度为两项生态系统服务标准化值在二维坐

标系的散点距 1:1 线的距离。因此,本研究利用 1:1 线的上方和下方的散点分别计算 RMSD,得到 1 型权衡强度和 2 型权衡强度值。两种权衡类型的识别为全面解析权衡机制提供了可行途径。

1.5 数据分析

将 1376 个小流域作为研究单元,利用箱图展示 2000—2020 年各地貌分区的生态系统服务及其权衡的时间趋势。选择归一化植被指数、年降水量、年均气温、坡度、土壤有机质含量、国内生产总值、人口密度、林地比例、草地比例、耕地比例、建设用地与水域比例作为驱动因素,利用 ArcGIS 软件分区统计与面积制表功能提取小流域各因素值。采用随机森林模型识别驱动因素重要性,利用偏依赖分析揭示驱动因素的阈值效应,利用沙普利加性解释 (SHAP) 方法阐明双变量的交互作用规律。

2 结果与分析

2.1 生态系统服务的时空分异

由图 2 可知,2000—2020 年固碳服务表现为增加的趋势,体现了汾河流域 20 年来生态恢复的成效。20 年来土壤保持服务同样表现为增加的趋势,但是增加程度不及固碳服务。2000—2015 年产水服务变化不大,平原区、台地区、梁峁区、山地区产水服务中值分别在 29.9—35.3mm、33.6—42.2mm、25.5—37.1mm、29.1—33.5mm 范围内波动,但是产水服务的本体最大值(箱图的端线)呈现下降的趋势。2020 年产水服务明显升高,地貌类型间产水服务中值在 76.0—97.9mm 范围内波动,原因是 2020 年汾河流域降水量偏高。

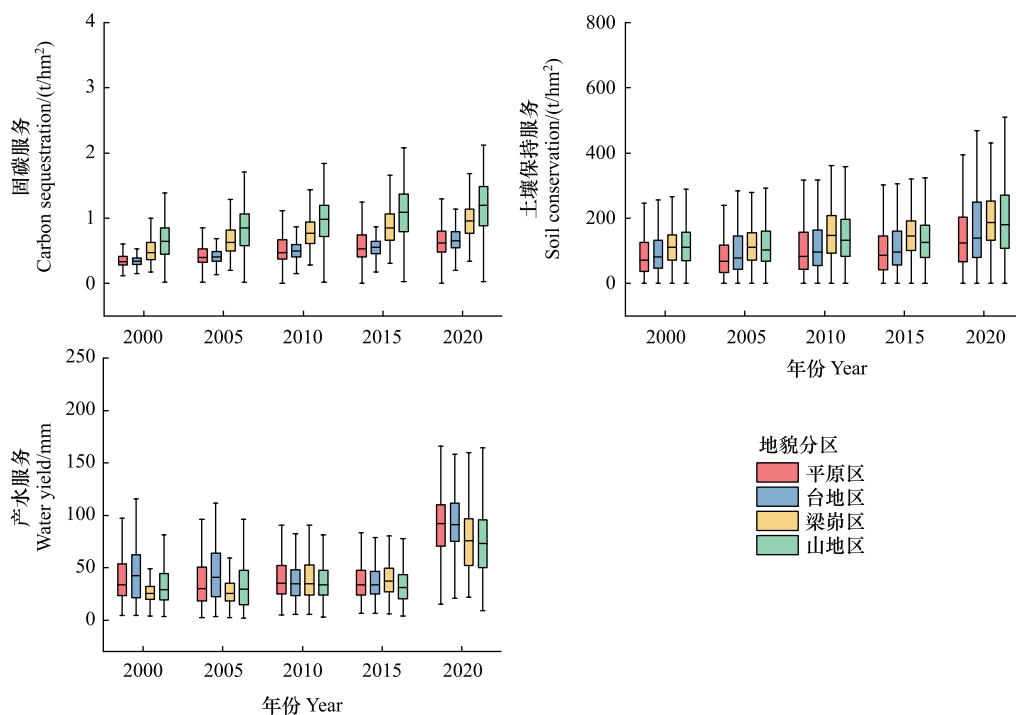


图 2 2000—2020 年生态系统服务箱图

Fig.2 Boxplot of ecosystem services from 2000 to 2020

从空间分布来看,固碳服务表现为从汾河谷地向周围山地逐渐增加的趋势(图 3)。地貌分区之间表现为平原区与台地区固碳服务最低,梁峁区居中,山地区最高(图 2)。从数据波动范围来看,山地区和梁峁区波动较大,一方面说明植被质量空间差异较大,另一方面说明未来植被恢复潜力较大。土壤保持服务表现为西北部、中部以及东南部较高,北部的太原盆地和南部的临汾盆地较低。从地貌分区来看,平原区土壤保持服务中值最低,台地区居中,梁峁区与山地区最高并且相差不大。各地貌分区土壤保持服务数据波动均较大,2020 年达到最大,说明地貌分区内部植被、土壤、降水等因素差异较大。不同年份之间产水服务呈现不同的空间分

异,2000 年和 2005 年表现为南部较高,北部较低的趋势,产水服务中值在台地区最高,平原区居中,梁峁区和山地区最低;2010 和 2015 年产水服务表现为南部和北部较高,中部较低的趋势,中值在各地貌分区之间差异不大;2020 年产水服务表现为西北部较低,其他区域均较高的趋势,中值表现为平原区和台地区较高,梁峁区和山地区较低的趋势。2020 年产水服务升高的同时其数据的波动性也明显增加,说明了偏高降水年份下产水服务的不确定性增加。

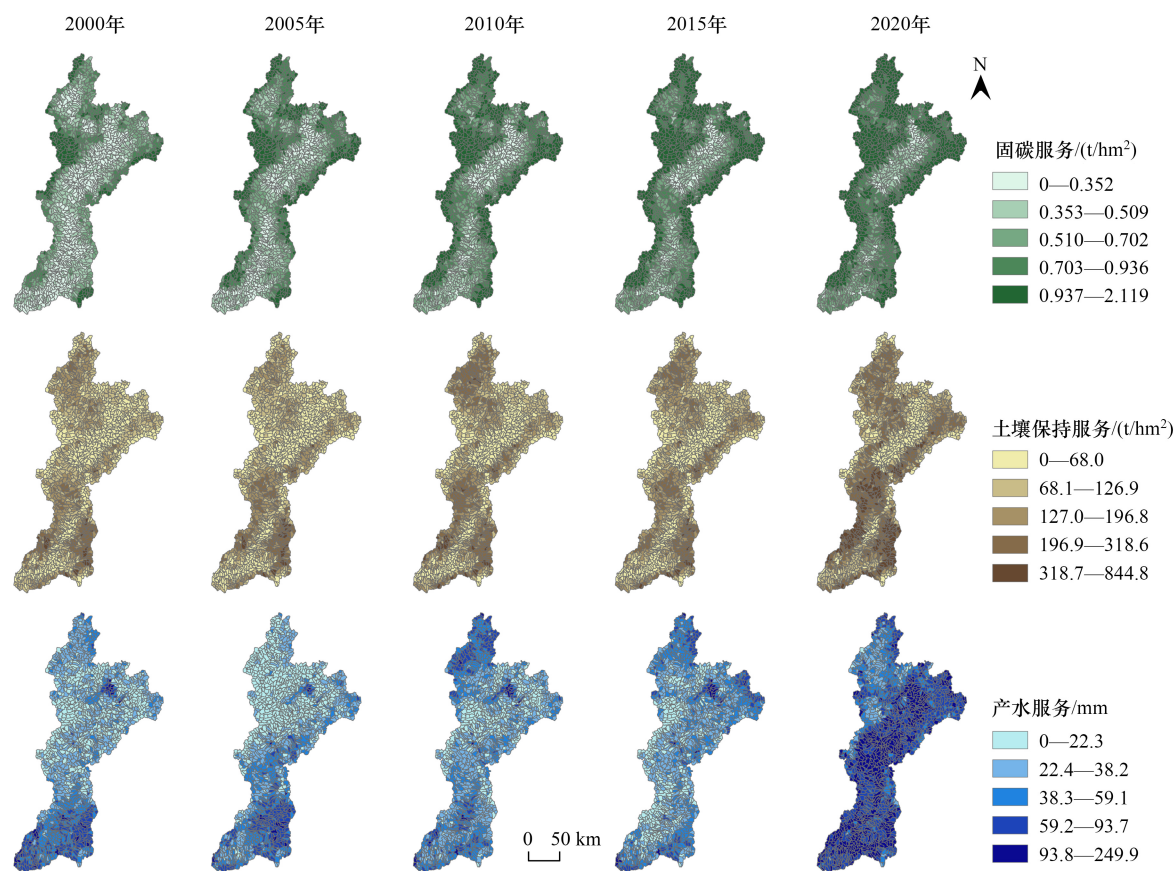


图 3 2000—2020 年生态系统服务空间分异

Fig.3 Spatial differentiation of ecosystem services from 2000 to 2020

2.2 生态系统服务权衡的时空分异

由图 4 可知,平原区 1 型固碳-产水服务权衡强度中值表现为先升高再下降再升高的趋势,原因是平原区人类活动对土地开发和植被恢复的影响较为强烈,导致权衡强度的时间变化更为复杂;台地区、梁峁区和山地区表现为 2000—2015 年权衡强度持续升高但 2020 年下降的趋势,原因是退耕还林等植被恢复活动导致固碳能力持续提升,进而加剧了固碳服务相对占优的 1 型固碳-产水服务权衡强度,但是 2020 年偏高的降水量扭转了权衡强度持续走高的态势。平原区和台地区 2000—2020 年 2 型固碳-产水服务权衡表现为先下降再升高的趋势,梁峁区表现为先升后降再升高的趋势。2020 年偏高的降水量导致上述 3 个地貌区产水服务增加,引起 2 型固碳-产水服务权衡强度的升高。但是这种趋势在山地区并不明显,2000—2020 年间权衡强度差异不大。

2000—2020 年 1 型水土保持-产水服务权衡强度中值在平原区表现为先下降再升高的趋势,在台地区、梁峁区和山地区表现为先升高再下降的趋势,这是降水、植被与地形综合作用的结果。2000—2020 年 2 型水土保持-产水服务权衡强度中值在平原区和台地区呈现先缓慢下降再显著升高的趋势。梁峁区和山地区呈现先缓慢升高再显著升高的趋势。2020 年偏高的降水加剧了产水服务相对占优的 2 型水土保持-产水服务权衡强

度,改变了权衡强度 15 年间缓慢变化的状态,说明了降水因素的重要性。

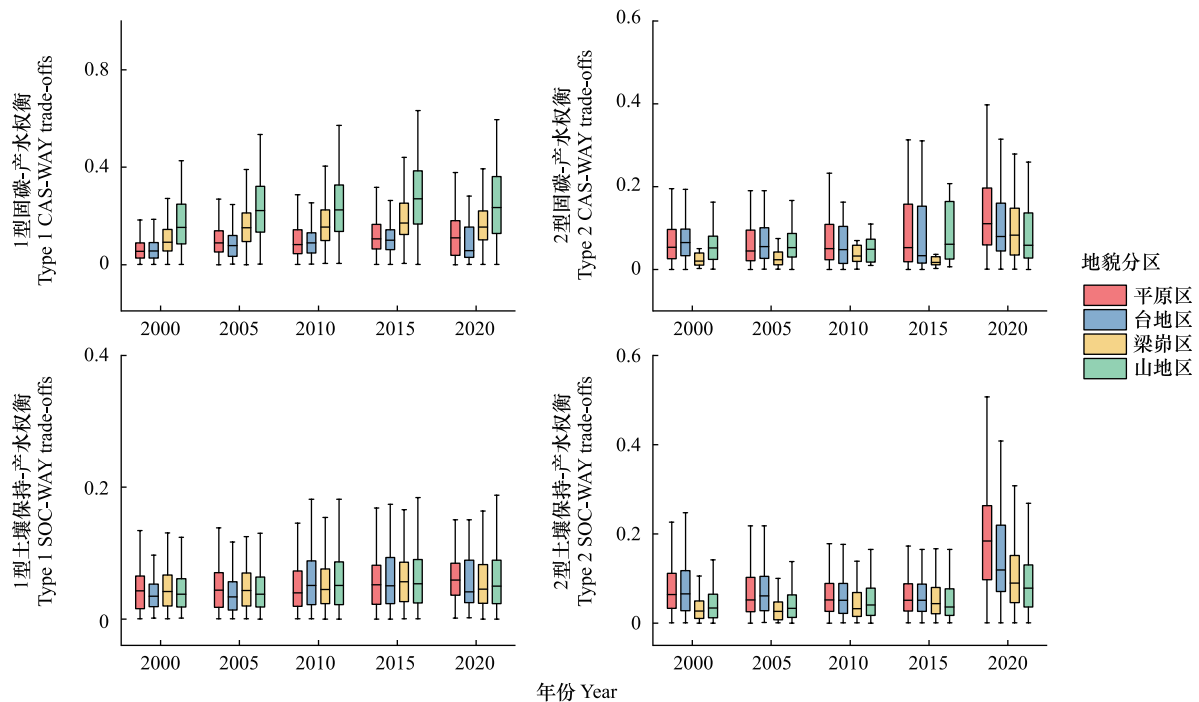


图4 2000—2020 年生态系统服务权衡强度箱图

Fig.4 Boxplot of trade-off intensity of ecosystem service from 2000 to 2020

从地貌分区之间的差异来看:1 型固碳-产水服务权衡强度表现为山地区最高,梁峁区居中,台地和平原区最低的趋势(图4)。正常降水年份(2000—2015 年)地貌分区之间表现为梁峁区 2 型固碳-产水服务权衡强度最低,其他 3 类地貌分区之间相差不大,说明梁峁区这种黄土地貌其产水服务能力相对固碳而言处于弱势地位,应提高其产水服务能力。降水偏高年份(2020 年)地貌分区之间表现为平原区>台地区>梁峁区>山地区,反映了降水、植被与地形的综合作用。从 1 型与 2 型权衡在地貌区之间的分布来看:1 型权衡主要分布于梁峁区与山地区,2 型权衡主要分布于平原区与台地区(图5)。2000—2015 年 1 型权衡处于主导地位并且其空间范围逐渐扩大,小流域数量占比从 2000 年的 76.3%增加到 2015 年的 93.4%。与之相反,2 型权衡的空间范围逐渐缩小,2015 年缩小至太原盆地与临汾盆地的少部分区域。由此可见,若降水量保持不变,退耕还林等植被恢复活动导致产水服务的相对劣势地位将持续加剧,水资源安全需引起重视。2020 年偏高的降水量打破了这种空间变化趋势,2 型权衡的小流域数量占比升高至 34.9%。

地貌分区之间 1 型土壤保持-产水服务权衡强度的差异并不明显(图4)。2 型土壤保持-产水服务权衡强度中值在 2000—2015 年呈现了平原区与台地区较高,梁峁区与山地区较低的趋势,2020 年权衡强度中值呈现了平原区>台地区>梁峁区>山地区的趋势。原因是平原区与台地区耕地和建设用地比例较高,林草地比例较低,更有利于产水服务,导致 2 型土壤保持-产水服务权衡强度较高。同时,2020 年偏高的降水量也增加了各地貌分区数据的波动性,尤其是平原区与台地区,意味着土壤侵蚀与径流风险可能增加。从 1 型与 2 型权衡在地貌区之间的分布来看:1 型权衡主要分布于梁峁区与山地区,2 型权衡主要分布于平原区与台地区以及流域边缘的部分山地区和梁峁区(图5)。2000—2015 年 1 型和 2 型权衡空间分布相对稳定,1 型权衡高值区位于流域西北部、中部和东南部的山地区和梁峁区,2 型权衡的高值区位于太原盆地和临汾盆地的局部地区。2020 年 2 型权衡的占比升高,在汾河谷地形成集中连片的分布格局,而且开始向周围的梁峁区与山地区蔓延。可见,偏高的降水量对权衡分布格局产生了重要影响。

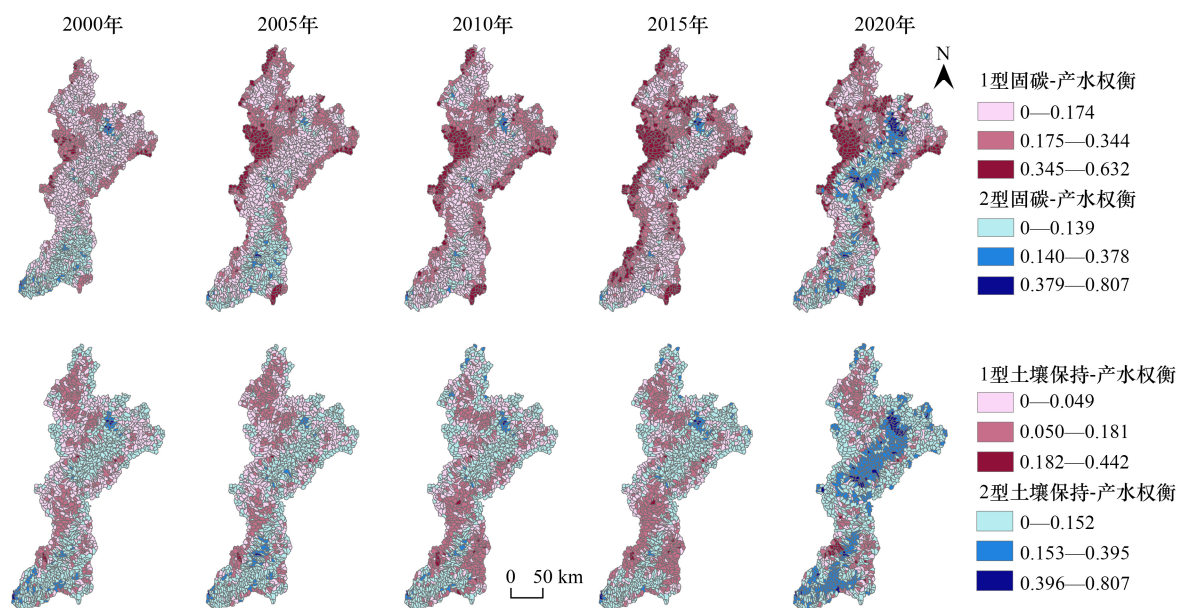


图5 2000—2020年生态系统服务权衡空间分异

Fig.5 Spatial differentiation of ecosystem service trade-offs from 2000 to 2020

2.3 1型固碳-产水服务权衡的非线性驱动特征

囿于篇幅,仅分析2020年权衡与驱动因素数据,以反映近期生态系统服务权衡的驱动机制。选定的12个驱动因素中只有水域比例对1型固碳-产水服务权衡的影响不显著,而林地比例、年降水量、年均气温和建设用地比例的影响处于前4位(图6)。1型固碳-产水服务权衡是指固碳服务具有相对优势,因此林地比例能够增加权衡强度,并且表现为线性驱动特征(图7)。年降水量有助于产水服务,能够减弱权衡强度并且表现为非线性驱动特征,年降水量处于500—700mm之间时作用最强,年降水量小于500mm或大于700mm时作用较弱。年均气温对1型固碳-产水服务权衡具有明显的阈值效应,年均气温在7℃以下时缓慢加剧权衡强度,7—10℃急剧的减弱权衡强度,超过10℃缓慢的减弱权衡强度。原因是气温不仅表现为从南向北逐渐降低的趋势,也表现为越靠近汾河谷地气温越高的趋势。综合权衡强度、土地利用与气温分布数据发现:气温低于7℃时林地比例较高,气温增加促进蒸发散,导致产水量降低进而加剧权衡强度。气温大于7℃时林地减少且耕地增加,显著增加产水量,掩盖了气温升高导致蒸散发增加的作用。建设用地比例低于10%时能够显著抑制权衡强度,超过10%后抑制作用很弱。

图8展示了前4个驱动因素之间的交互作用。林地比例很低时尽管降水量较低其依然能够抑制权衡,随着林地比例升高散点出现了向上(加剧权衡)和向下(抑制权衡)两个趋势方向,向上的散点对应的降水量(700mm以下)小于向下的散点(700mm以上)。可见,林地因耗水降低产水量导致固碳-产水服务权衡的一般规律在降雨充足区域不再适用,这些区域将有利于多项生态系统服务的同步提高。林地和气温的交互作用表现为:气温较高但林地比例很低时以加剧权衡为主,气温较低但林地比例很高时以抑制权衡为主,说明了气温调节蒸散发对控制权衡强度的作用超过林地。降水与气温的交互作用表现为:降水较高且气温较低时抑制权衡,降水处于中高水平且气温较高而时加剧权衡,这反映了降水和蒸散发对产水量的综合影响。建设用地比例较低时,较高的降水量能够抑制权衡;建设用地比例较高时,即使降水量降低,依然对权衡具有抑制作用。气温与建设用地交互作用呈现的主要趋势为:气温较高并且建设用地比例较高时加剧权衡,而气温较低并且建设用地比较低时抑制权衡,这说明气温的主导作用。但是最下方的散点(12个小流域)呈现了相反的规律,气温中等,较高的建设用地比例抑制了权衡强度,这说明了建设用地的主导作用。

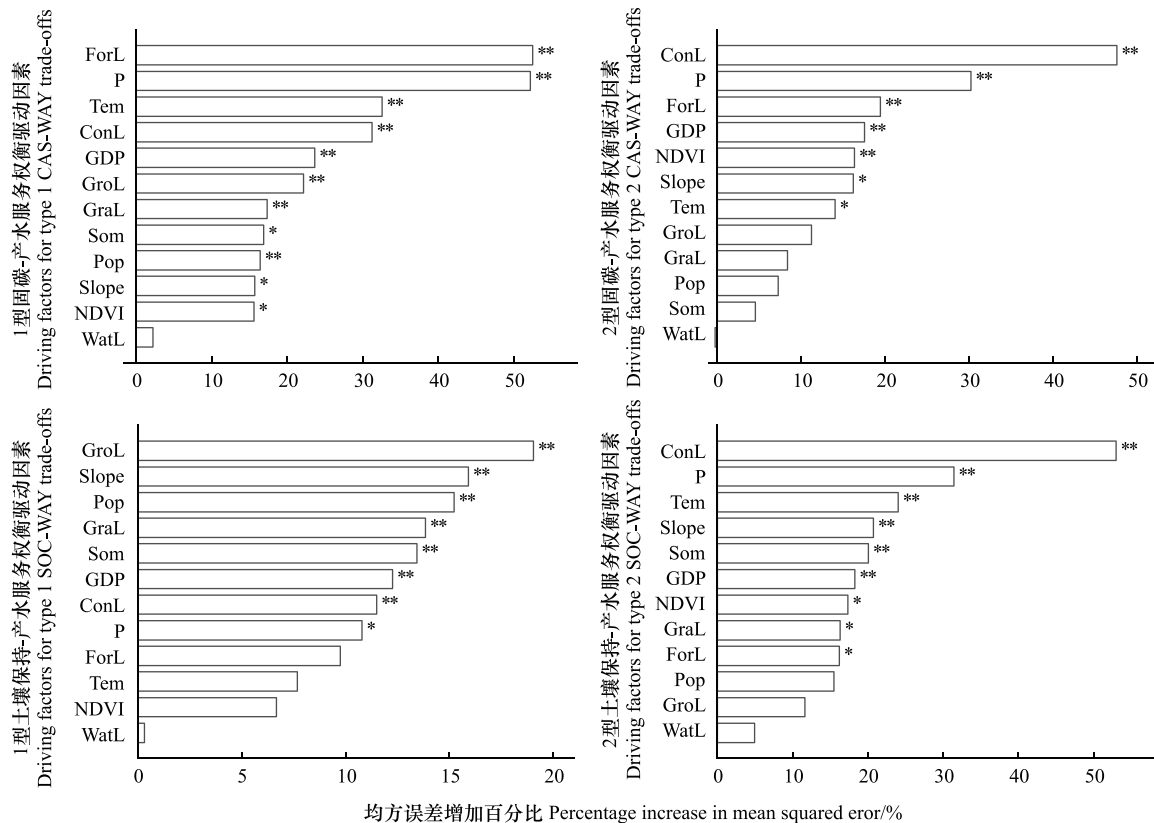


图6 生态系统服务权衡驱动因素重要性与显著性

Fig.6 Importance and significance of driving factors for ecosystem service trade-offs

** 表示 $P < 0.01$, * 表示 $P < 0.05$; NDVI: 归一化植被指数; P: 年降水量; Tem: 年均气温; Slope: 坡度; Som: 土壤有机质含量; GDP: 国内生产总值; Pop: 人口密度; ForL: 林地比例; GraL: 草地比例; GroL: 耕地比例; ConL: 建设用地比例; WatL: 水域比例

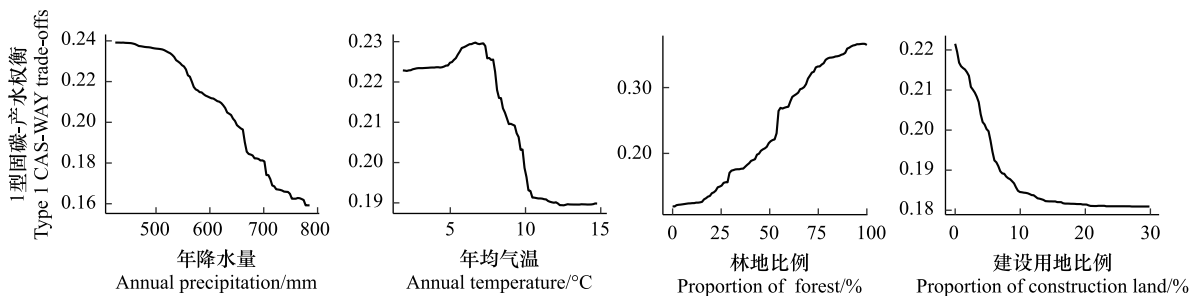


图7 主导因素对1型固碳-产水权衡的非线性影响

Fig.7 Nonlinear effects of leading factors on type 1 trade-off between CAS and WAY

CAS: 固碳服务 Carbon sequestration; WAY: 产水服务 Water yield

2.4 2型固碳-产水服务权衡的非线性驱动特征

对2型固碳-产水服务权衡的影响处于前4位的是建设用地比例、年均降水量、林地比例和GDP(图6)。当建设用地比例低于60%时,其对权衡的促进作用较大,超过60%后其促进作用较低(图9)。降水的非线性驱动特征与建设用地相似,年均降水量低于620mm时促进作用较强,超过620mm后影响很弱。林地的蒸散发作用较为强烈,降低产水量导致2型固碳-产水服务权衡减弱。林地比例低于25%时对于权衡的抑制作用很强,超过25%后影响很弱。GDP表现了与建设用地相似的非线性驱动特征,不同的是GDP数据在低值处集中,偏依赖图的前段更为陡峭。

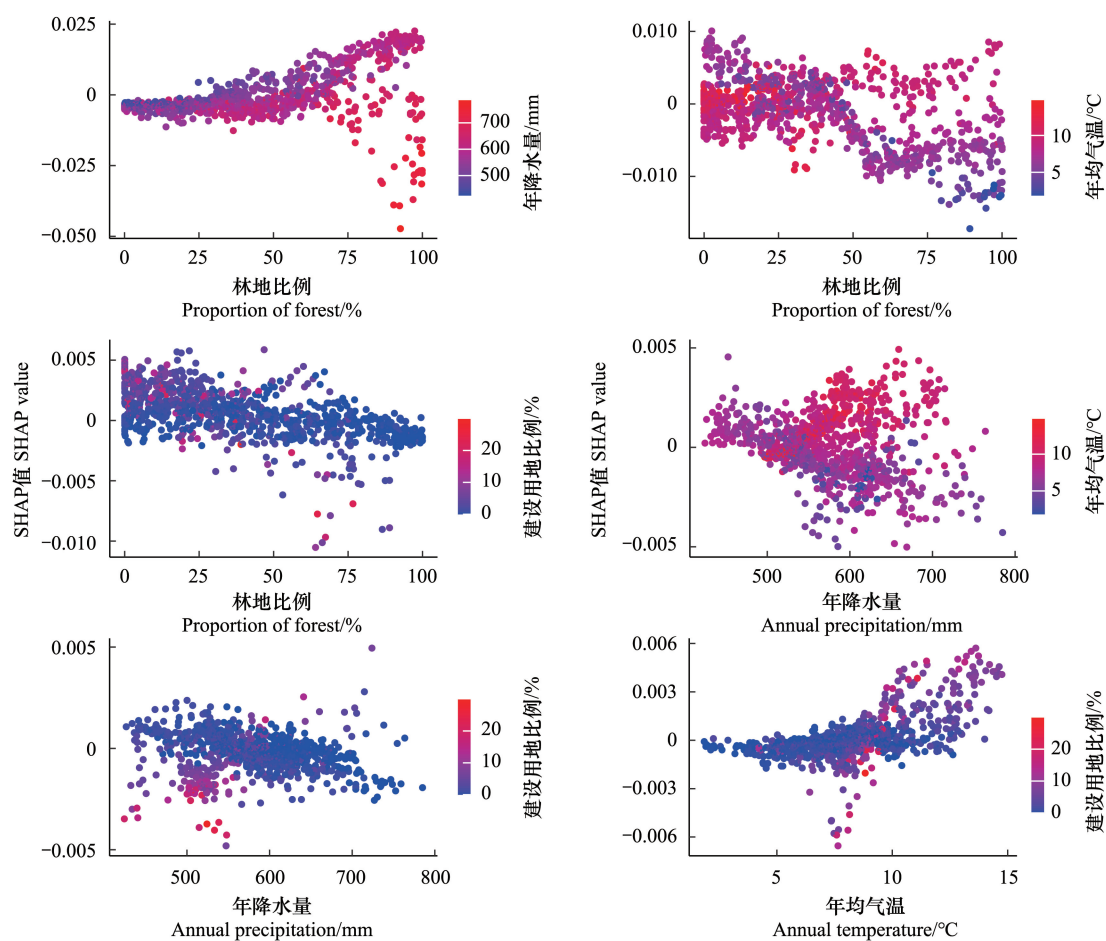


图8 驱动因素对1型固碳-产水权衡的交互作用

Fig.8 Interaction of factors on type 1 trade-off between carbon sequestration and water yield

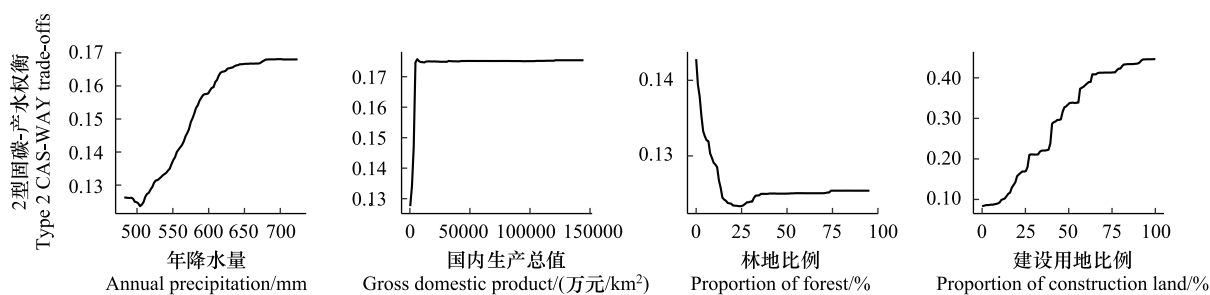


图9 主导因素对2型固碳-产水权衡的非线性影响

Fig.9 Nonlinear effects of leading factors on type 2 trade-off between CAS and WAY

CAS:固碳服务 Carbon sequestration; WAY:产水服务 Water yield

建设用地与降水量的交互作用呈现两种格局:降水量较高时(偏红色散点),建设用地能够快速增加权衡强度,降水量较低时(偏蓝色散点),建设用地相对缓慢的增加权衡强度(图10)。建设用地与林地的交互作用表现为:当林地比例较低时,较低的建设用地比例(25%以下)对权衡强度具有正负效应,但是较高的建设用地比例(25%以上)主要表现为正效应;林地比例较高时,其正负效应皆存在,说明还存在其他因素的影响。建设用地与GDP的交互也呈现两种分布格局:建设用地比例低于20%(占小流域数量的70.4%)时,GDP相对较低,散点集中分布,主要表现为正效应;当建设用地比例高于50%时,对应较高的经济发展水平,散点较为分散,对权衡强度表现为负效应,原因是这些城市化区域存在热岛效应等下垫面特征,蒸散发强烈。降水量

与林地比例的交互作用表现为:林地比例较低时,权衡强度随降水量增加,而林地比例较高时,即使降水量较高,对权衡强度仍然表现为负效应。

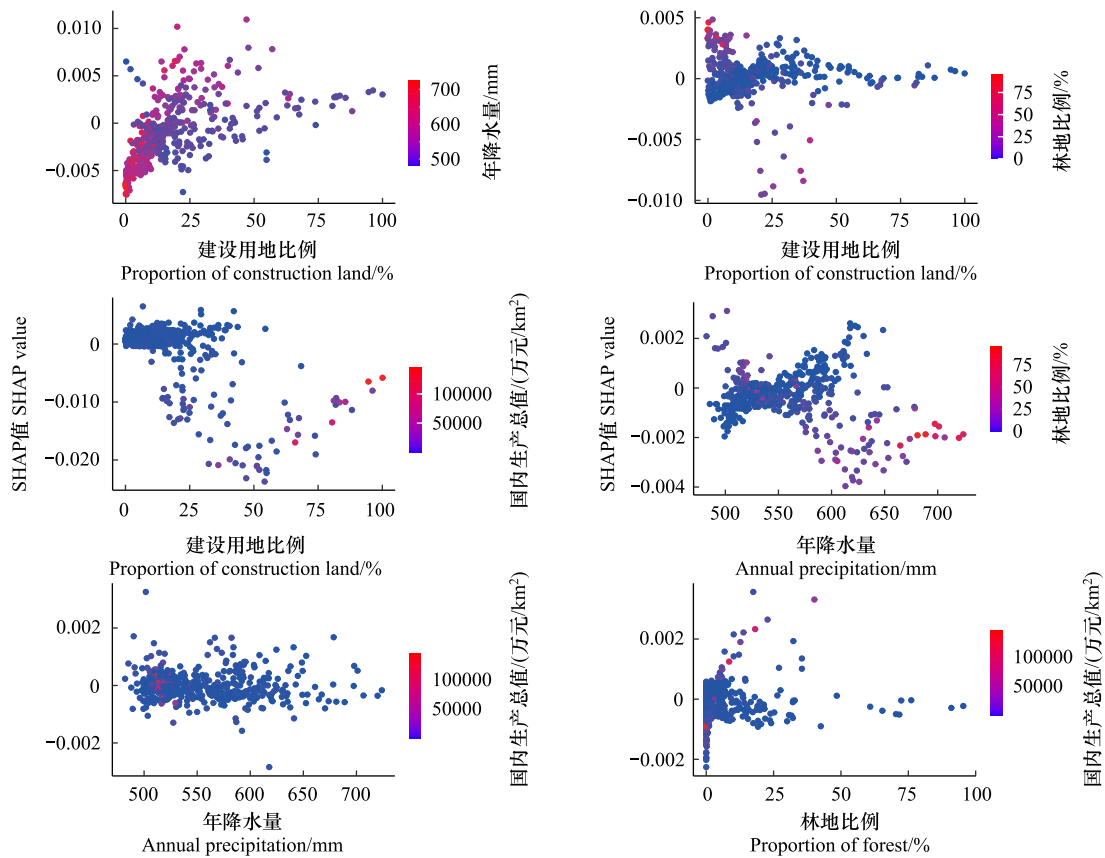


图 10 驱动因素对 2 型固碳-产水权衡的交互作用

Fig.10 Interaction of factors on type 2 trade-off between carbon sequestration and water yield

2.5 1 型土壤保持-产水服务权衡的非线性驱动特征

耕地、坡度、人口密度与草地比例对 1 型土壤保持-产水服务权衡的影响处于前 4 位,均达到了极显著水平(图 6)。耕地比例整体表现为降低权衡强度,耕地比例小于 30% 时该作用较为明显,超过 30% 后影响趋势出现波动(图 11)。权衡强度随坡度增加而增加,当坡度超过 20% 后该效应减弱。人口密度小于 600 人/ km^2 时(占小流域数量的 92.3%) 权衡强度集中在 0.065 附近,人口密度大于 700 人/ km^2 时(仅占小流域数量的 3.8%) 权衡强度约为 0.11 不变。草地的非线性驱动特征与耕地相似,说明了草地在产水服务方面的优势。

耕地比例和坡度的交互作用规律较为明显(图 12):耕地比例增加的主要效应为抑制权衡强度,较高坡度下这种效应更为显著,这可能与较高的降水量有关。耕地与草地的交互作用呈现两种格局:草地比例较高时,耕地增加对权衡强度的影响很小(偏红色散点沿着 $\text{SHAP}=0$ 线下方分布),反映了以草地为主导的负效应;草地比例较低时,耕地比例越高其对权衡的抑制作用越强,反映了耕地的主导作用。坡度与草地的交互作用规律不明显,但是散点的分布并不集中,说明了坡度与草地组合的多样性与差异性。人口密度与草地的交互作用呈现 4 种格局: $\text{SHAP}=0$ 线和人口密度 = 600 人/ km^2 线将散点分成四个象限,分别表示高人口密度与低草地比例对权衡的促进作用,低人口密度与高草地比例的促进作用,低人口密度与低草地比例对权衡的抑制作用,以及高人口密度与高草地比例的抑制作用。由此可见权衡驱动因素的多变性,这在权衡调控中需高度重视。

2.6 2 型土壤保持-产水服务权衡的非线性驱动特征

对 2 型土壤保持-产水服务权衡的影响处于前 4 位的驱动因素分别为建设用地比例、年降水量、年均气温和

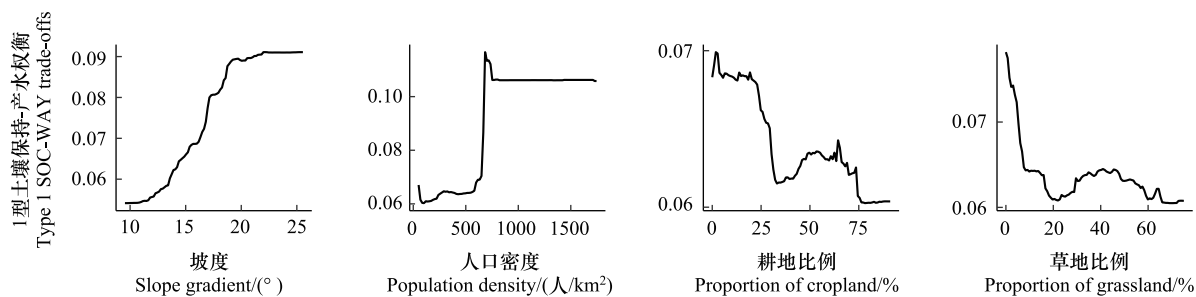


图 11 主导因素对 1 型土壤保持-产水权衡的非线性影响

Fig.11 Nonlinear effects of leading factors on type 1 trade-off between SOC and WAY

SOC:土壤保持服务 Soil conservation; WAY:产水服务 Water yield

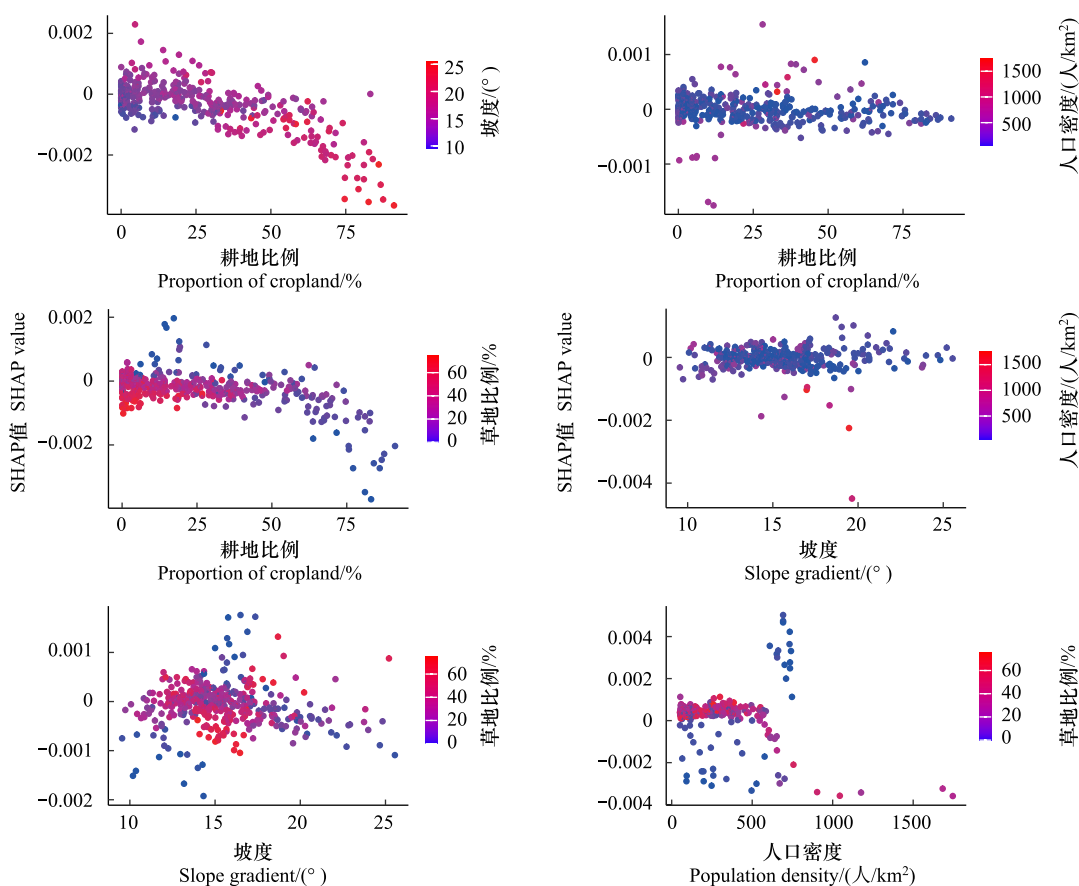


图 12 驱动因素对 1 型土壤保持-产水权衡的交互作用

Fig.12 Interaction of factors on type 1 trade-off between soil conservation and water yield

坡度(图 6)。建设用地有利于产水服务,因此其促进了 2 型土壤保持-产水服务权衡,但是当建设用地比例超过 50%后其促进作用减弱(图 13)。降水是产水服务的直接来源,加剧了权衡强度,降水量在 500mm、700mm 和 730mm 处存在 3 个拐点,不同降水量区间其加剧权衡的效应不同。年均气温小于 9℃时权衡强度随着气温升高而降低,说明了气温升高增加蒸散发的主导作用;年均气温大于 9℃时权衡强度随气温升高而升高,原因是气温较高区域多为汾河谷地,建设用地等有利于产水的土地利用类型增加,这也说明了土地利用类型对权衡的主导作用。权衡强度随坡度增加整体表现为降低的趋势,在坡度小于 13°时(小流域数量占比 50.5%)较为明显,13—23°之间时(小流域数量占比 46.7%)坡度的作用微弱,超过 23°后随着坡度增加权衡强度略有提升。

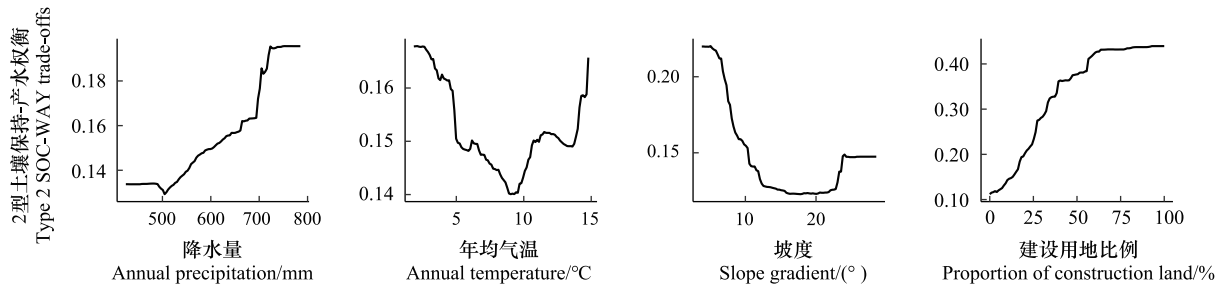


图 13 主导因素对 2 型土壤保持-产水权衡的非线性影响

Fig.13 Nonlinear effects of leading factors on type 2 trade-off between SOC and WAY

SOC:土壤保持服务 Soil conservation; WAY:产水服务 Water yield

建设用地与降水的交互作用呈现两种趋势:降水量较低时,权衡强度随建设用地的增加而增加(蓝紫色散点);降水量较高时,权衡强度以更高的比率增加(偏红色散点)(图 14)。建设用地与坡度的交互作用呈现两种格局:坡度较高时,建设用地对权衡的正效应集中在 SHAP=0 线上方附近,SHAP 值随建设用地变化不大(偏红色散点);坡度较低时,随着建设用地增加,其对权衡的效应表现为先降低再升高的趋势,一方面说明建设用地对权衡的影响并非一成不变,另一方面也说明了其他因素的影响,侧面印证了单因素作用与交互作用的差异(图 13 和图 14)。降水与坡度之间的交互作用表现为两种格局:坡度较低时,降水增加(降水量在

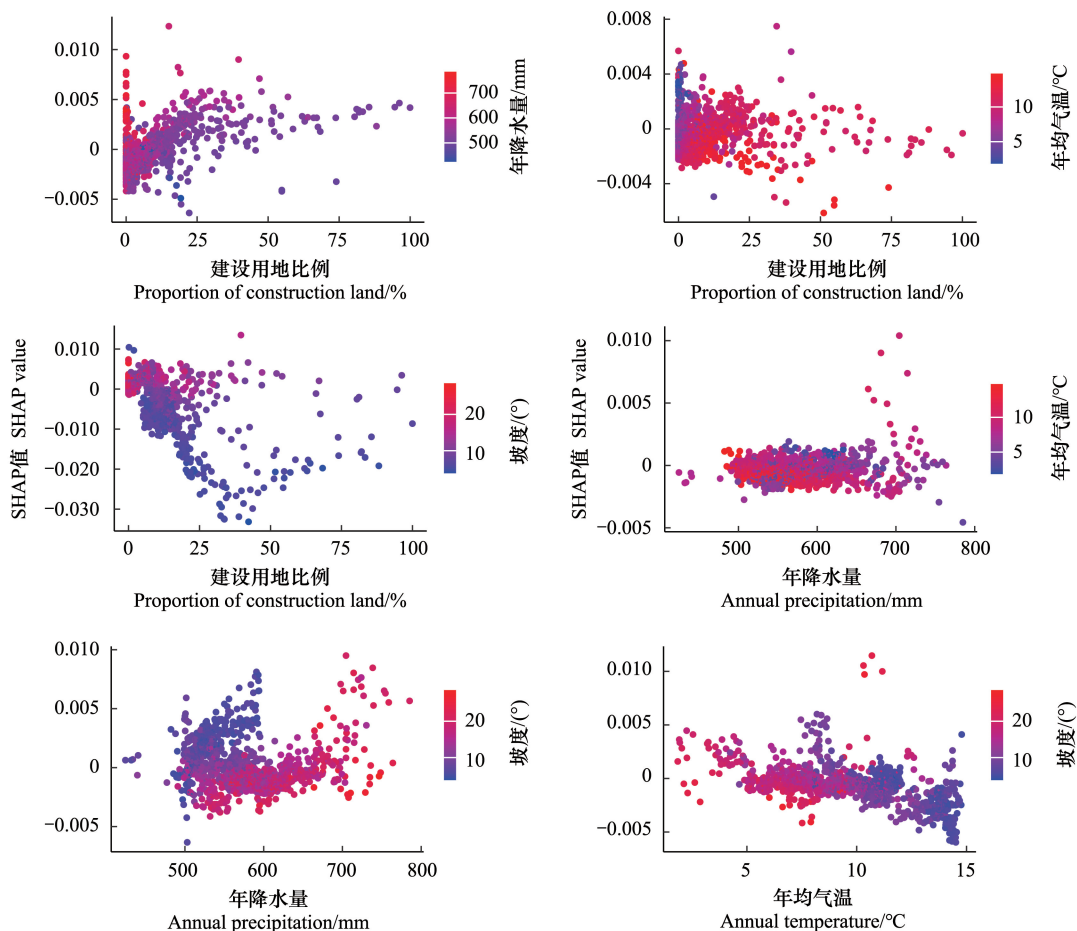


图 14 驱动因素对 2 型土壤保持-产水权衡的交互作用

Fig.14 Interaction of factors on type 2 trade-off between soil conservation and water yield

420—600mm 之间)对权衡具有促进作用(偏蓝色散点);坡度较高时,权衡强度随着降水增加表现为先缓慢增加再快速增加的趋势(偏红色散点),原因是较高坡度区域往往林地比例较高,林地的蒸散耗水作用削弱了降水对产水服务的直接促进效应。气温和坡度的交互效应表明坡度较低的区域气温较高,较强的蒸散作用降低产水量从而降低权衡强度,坡度较高的区域,气温对权衡的作用规律不明显。

3 讨论

3.1 生态系统服务及其权衡强度时空特征的稳定性与变异性

人类活动对地球表层的影响具有一定的时空特征,如城市化过程带来人工地表增加而退耕还林带来黄土高原“变绿”,这些过程使生态系统服务及其权衡显现一定的时空格局^[24–25],本文发现该时空格局具有稳定性与变异性特征。从时间来看,固碳与土壤保持服务中值在 2000—2020 年间呈现稳定增加的趋势,而产水服务中值在 2000—2015 年变化不大但本体最大值呈现下降的趋势,这种稳定趋势的主要原因是植被恢复活动,该结果和前人对黄土高原的研究相似^[15, 26–27]。但是 2020 年产水服务出现了大幅度的增加,主要原因是 2020 年降水量偏高,Xu 等^[28]也发现了类似的结果。从空间来看:固碳服务主要受植被影响,土壤保持服务受植被、地形、土壤与降水等因素的综合影响,因此两者的空间格局在 20 年间相对稳定。但是产水服务的空间格局并不稳定,20 年间产水服务从南部较高变为南部和北部均较高,再变为高值区在汾河谷地集中连片的空间格局。已有研究发现降水会改变产水服务的空间格局^[19, 29–30],这与本研究的结果相似。

生态系统服务权衡反映了两项服务之间的关系,其时空格局更为复杂。从时间来看,1 型固碳-产水服务权衡在 2000—2015 年间稳定增加(平原区除外),2020 年突然下降,这与两项服务的消涨趋势相对应。山区 2 型固碳-产水服务权衡在 20 年间相对稳定,但是其他 3 个地貌区的时间趋势并不一致。土壤保持-产水服务权衡的时间格局也呈现了一定的稳定性与变异性,1 型权衡 20 年来地貌区之间变化趋势不一致,2 型权衡在 2000—2015 年相对稳定,但是 2020 年大幅增加。已有研究往往未区分权衡类型,发现了权衡强度增加或降低的趋势^[23, 31],这是两类权衡结果综合后的外在表现。从空间来看,2000—2015 年 1 型固碳-产水服务权衡的空间范围逐渐扩大,2 型权衡空间范围相对萎缩,但是 2020 年该趋势发生逆转。2000—2015 年 1 型和 2 型土壤保持-产水权衡空间相对位置比较稳定,2020 年发展为 2 型权衡处于主导的空间格局。未区分权衡类型的权衡强度空间格局受到较多的关注^[7, 32–33],属于权衡强度的宏观表达,本研究无法与其进行对比分析。上述结果说明区分权衡类型的必要性,其更加精细的刻画了生态系统服务及其权衡时空格局的稳定性与变异性。

3.2 生态系统服务权衡驱动因素的复杂性

生态系统服务及其权衡受地形、生物、土壤、降水等诸多因素控制^[34–35],不同时空条件下主导因素存在差异并且往往表现为复杂的非线性驱动特征。已有研究利用分段线性回归与约束线方程拟合等方法识别了生态系统服务及其权衡的影响阈值,发现降水、NDVI 与林草地比例的影响往往存在拐点^[36–37]。本研究与之相似,发现降水、气温、坡度、土地利用、人口密度等因素对权衡强度的影响均存在阈值效应。例如,年均气温在 7℃ 以下对 1 型固碳-产水服务权衡具有缓慢促进作用,7—10℃ 对权衡具有急剧的降低作用,10℃ 以上对权衡的抑制作用减缓。该阈值效应形成原因比较复杂,气温不仅表现为从南高北低的宏观格局,还因地形与人类活动的作用,气温呈现为汾河谷地高于周围山地的趋势。所以气温、地形与土地利用具有一定的关联关系,多因素的综合作用通过气温来表现:气温低于 7℃ 的区域对应较高的林地比例,随着气温升高林地的蒸散发作用也增加,导致产水量降低进而加剧 1 型固碳-产水服务权衡强度;气温大于 7℃ 区域林地减少且耕地增加,土地利用变化对产水服务增强的作用更为显著,最终导致 1 型固碳-产水服务权衡强度急剧下降,其本质是土地利用的主导作用掩盖了气温升高-蒸散发增加-权衡强度加剧的驱动模式。可见,单因素的阈值效应比较复杂,进一步的多因素交互作用解析在驱动机制研究中变得非常必要。

耦合随机森林模型与沙普利加性解释方法能够较好的解释双变量对生态系统服务的交互作用。乐荣武

等^[38]对呼包鄂榆城市群的研究发现水域、林地比例分别为重要的交互项,不同因素水平下交互效应存在差异。本研究发现了相似的结果,例如林地与降水对 1 型固碳-产水服务权衡交互作用表现为在林地比例较低的区域尽管降水量较低其仍然能够抑制权衡,随着林地比例升高交互效应呈现两种格局,700mm 以下降水量对权衡的增强作用和 700mm 以上降水量对权衡的抑制作用。植被耗水降低产水量导致固碳-产水服务权衡是黄土高原地区的一般规律^[23, 39]。该规律并不适用于降水充足地区或降水充足年份;段宝玲等^[40]对湿润地区自然保护区的研究发现产水服务与固碳等调节服务之间表现为弱权衡或无明显作用关系;Zhang 等^[41]发现黄土高原区域降水增加量超过了植被恢复引起的蒸散增加量,进而出现地表产水显著上升的现象,说明植被-气候的反馈作用不可忽略。可见,植被覆盖与气候资源的适配是多项生态系统服务协调的重要条件。汾河流域的生态恢复需要考虑水资源的植被承载力,根据降水条件的时空分异合理配置植被类型与比例。此外,针对 2 型固碳-产水服务权衡,建设用地与降水、建设用地与林地比例、建设用地与 GDP、降水量与林地比例之间的交互作用呈现了一定的趋势特征;针对 1 型/2 型土壤保持-产水服务权衡,耕地与坡度、耕地与草地、人口密度与草地、建设用地与降水、建设用地与坡度、降水与坡度之间的交互作用也都呈现了明确的趋势特征。上述结果说明对权衡类型的识别能够明确两项生态系统服务此消彼长的方向,为权衡分析提供了更丰富的视角。

4 结论

2000—2020 年生态修复成效明显,固碳与土壤保持服务均表现为增加的趋势,2000—2015 年产水服务相对稳定但 2020 年偏高的降水量导致产水服务明显升高。2000—2015 年除平原区外 1 型固碳-产水服务权衡持续增加,但 2020 年突然下降。山地区 2 型固碳-产水服务权衡在 20 年间变化不大,但是其他 3 个地貌区的时间趋势各异。地貌区之间 20 年来 1 型土壤保持-产水服务权衡的时间趋势不一致,2 型土壤保持-产水服务权衡在 2000—2015 年相对稳定,但是 2020 年大幅增加。

固碳服务表现为从汾河谷地向周围山地逐渐增加的趋势。土壤保持服务表现为西北部、中部以及东南部的山地丘陵较高,北部的太原盆地和南部的临汾盆地较低。不同年份之间产水服务呈现不同的空间分异,2000—2020 从南部较高发展到南北均较高,最终发展为在汾河谷地集中连片分布。2000—2015 年 1 型固碳-产水服务权衡的空间范围逐渐拓展但 2 型权衡相对萎缩,该趋势在 2020 年发生逆转。2000—2015 年 1 型和 2 型土壤保持-产水权衡空间相对位置比较稳定,但 2020 年演变为 2 型权衡处于主导的空间格局。降水量的增加是 2020 年时空趋势变化的重要外因。

降水、气温、坡度、土地利用、人口密度等因素对 1 型或 2 型权衡的影响均存在阈值效应,阈值效应一般是多个因子间综合作用后的外在表现。土地利用与气候或地形因子之间的交互效应往往存在明显的趋势特征,交互效应散点图提供了丰富的双因子驱动特征信息。林地与降水对 1 型固碳-产水服务权衡的交互效应是其中一个典型:较低林地比例水平下,尽管降水量较低其仍然能够抑制权衡(意味着更有利于产水服务),随着林地比例升高交互效应呈现两种格局,700mm 以下降水量对权衡的增强作用和 700mm 以上降水量对权衡的抑制作用。交互效应说明土地利用配置需要和气候资源及地形条件相匹配。在权衡类型识别视角下,通过耦合机器学习模型与解释工具,能够更为清晰的阐释权衡驱动机制这类“黑箱”系统,为生态系统服务调控提供了相对全面的理论依据。

参考文献 (References):

- [1] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [2] Bennett E M, Peterson G D, Gordon L J. Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecology Letters*, 2009, 12(12): 1394-1404.
- [3] 赵文武, 刘月, 冯强, 王亚萍, 杨思琪. 人地系统耦合框架下的生态系统服务. *地理科学进展*, 2018, 37(1): 139-151.
- [4] Lu N, Liu L, Yu D D, Fu B J. Navigating trade-offs in the social-ecological systems. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2021, 48:

77-84.

- [5] Neyret M, Fischer M, Allan E, Hölzel N, Klaus V H, Kleinebecker T, Krauss J, Le Provost G, Peter S, Schenk N, Simons N K, van der Plas F, Binkenstein J, Börschig C, Jung K, Prati D, Schäfer D, Schäfer M, Schöning I, Schrumpf M, Tschapka M, Westphal C, Manning P. Assessing the impact of grassland management on landscape multifunctionality. *Ecosystem Services*, 2021, 52: 101366.
- [6] 张建香, 汪亚峰, 张耀宗, 刘艳艳, 王东, 李旭升, 唐述林. 延河流域生态系统服务权衡/协同关系阈值效应. *生态学报*, 2024, 44(23): 10573-10581.
- [7] 石金鑫, 梁小英, 李辉蕾, 魏峥. 陕北黄土高原景观格局对生态系统服务权衡关系的影响. *生态学报*, 2023, 43(21): 8958-8972.
- [8] Schirpke U, Candiago S, Egarter Vigl L, Jäger H, Labadini A, Marsoner T, Meisch C, Tasser E, Tappeiner U. Integrating supply, flow and demand to enhance the understanding of interactions among multiple ecosystem services. *Science of The Total Environment*, 2019, 651: 928-941.
- [9] Stosch K C, Quilliam R S, Bunnefeld N, Oliver D M. Quantifying stakeholder understanding of an ecosystem service trade-off. *Science of The Total Environment*, 2019, 651: 2524-2534.
- [10] Forio M A E, Villa-Cox G, Van Echelpoel W, Ryckebusch H, Lock K, Spanoghe P, Deknock A, De Troyer N, Nolivos-Alvarez I, Dominguez-Granda L, Speelman S, Goethals P L M. Bayesian Belief Network models as trade-off tools of ecosystem services in the Guayas River Basin in Ecuador. *Ecosystem Services*, 2020, 44: 101124.
- [11] Li Z H, Deng X Z, Jin G, Mohammed A, Arowolo A O. Tradeoffs between agricultural production and ecosystem services: a case study in Zhangye, Northwest China. *Science of The Total Environment*, 2020, 707: 136032.
- [12] Ndong G O, Villerd J, Cousin I, Therond O. Using a multivariate regression tree to analyze trade-offs between ecosystem services: Application to the main cropping area in France. *Science of The Total Environment*, 2021, 764: 142815.
- [13] Wilhelm J A, Smith R G, Jolejole-Foreman M C, Hurley S. Resident and stakeholder perceptions of ecosystem services associated with agricultural landscapes in New Hampshire. *Ecosystem Services*, 2020, 45: 101153.
- [14] Xue Z J, Meng X W, Liu B. Spatiotemporal evolution and driving factors of ecosystem services in the upper Fenhe watershed, China. *Ecological Indicators*, 2024, 160: 111803.
- [15] Feng Q, Duan B L, Zhang X. Relationship between ecosystem-services trade-offs and supply-demand balance along a precipitation gradient: a case study in the central Loess Plateau of China. *Land*, 2024, 13(7): 1057.
- [16] Lundberg S M, Lee S I. A unified approach to interpreting model predictions. *Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems*, Long Beach, California, USA. 2017: 4768-4777.
- [17] Liu H L, Wang Z L, Zhang L P, Tang F, Wang G Y, Li M. Construction of an ecological security network in the Fenhe River Basin and its temporal and spatial evolution characteristics. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 417: 137961.
- [18] Su Y Q, Ma X H, Feng Q, Liu W, Zhu M, Niu J J, Liu G, Shi L J. Patterns and controls of ecosystem service values under different land-use change scenarios in a mining-dominated basin of northern China. *Ecological Indicators*, 2023, 151: 110321.
- [19] 蔡进, 危小建, 江平, 梁玉琦. 基于贝叶斯网络的生态系统服务权衡协同关系强度及其空间格局优化: 以汾河流域为例. *环境科学*, 2024, 45(5): 2780-2792.
- [20] Zhang L, Dawes W R, Walker G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, 2001, 37(3): 701-708.
- [21] 国家发展和改革委员会/国家统计局编. 生态产品总值核算规范. 北京: 人民出版社, 2022: 196-197.
- [22] Bradford J B, D'Amato A W. Recognizing trade-offs in multi-objective land management. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2012, 10(4): 210-216.
- [23] Feng Q, Zhao W W, Hu X P, Liu Y, Daryanto S, Cherubini F. Trading-off ecosystem services for better ecological restoration: a case study in the Loess Plateau of China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 257: 120469.
- [24] 傅伯杰. 黄土高原土地利用变化的生态环境效应. *科学通报*, 2022, 67(32): 3769-3779, 3768.
- [25] Wang J L, Zhou W Q, Pickett S T A, Yu W J, Li W F. A multiscale analysis of urbanization effects on ecosystem services supply in an urban megaregion. *Science of The Total Environment*, 2019, 662: 824-833.
- [26] 赵雪雁, 马平易, 李文青, 杜昱璇. 黄土高原生态系统服务供需关系的时空变化. *地理学报*, 2021, 76(11): 2780-2796.
- [27] Yu Z Y, Deng X Z, Cheshmehzangi A. The grain for green program enhanced synergies between ecosystem regulating services in Loess Plateau, China. *Remote Sensing*, 2022, 14(23): 5940.
- [28] Xu M J, Feng Q, Zhang S R, Lv M, Duan B L. Ecosystem services supply-demand matching and its driving factors: a case study of the Shanxi section of the Yellow River Basin, China. *Sustainability*, 2023, 15(14): 11016.
- [29] Huang W Y, Wang P, He L, Liu B Y. Improvement of water yield and net primary productivity ecosystem services in the Loess Plateau of China since the "Grain for Green" project. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 110707.

- [30] 侯晋星, 潘换换, 杜自强, 武志涛, 张红. 山西黄河流域水生态系统服务时空分析. 干旱区地理, 2024, 47(6): 1047-1060.
- [31] 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. 干旱区研究, 2024, 41(3): 467-479.
- [32] Liu J M, Wang H, Tang B T, Hui L, Zhang W J, Zhang L W, Jiao L. Analysis of temporal and spatial dynamics of ecosystem services and trade-offs/synergies during urbanization in the Loess Plateau, China. *Land*, 2023, 12(12): 2136.
- [33] Shi J X, Liang X Y, Wei Z, Li H Q. Spatial-temporal heterogeneity in the influence of landscape patterns on trade-offs/synergies among ecosystem services: a case study of the Loess Plateau of northern Shaanxi. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, 31(4): 6144-6159.
- [34] Le Provost G, Schenk N V, Penone C, Thiele J, Westphal C, Allan E, Ayasse M, Blüthgen N, Boeddinghaus R S, Boesing A L, Bolliger R, Busch V, Fischer M, Gossner M M, Hölzel N, Jung K, Kandeler E, Klaus V H, Kleinebecker T, Leimer S, Marhan S, Morris K, Müller S, Neff F, Neyret M, Oelmann Y, Perović D J, Peter S, Prati D, Rillig M C, Saiz H, Schäfer D, Scherer-Lorenzen M, Schloter M, Schöning I, Schrumpf M, Steckel J, Steffan-Dewenter I, Tschapka M, Vogt J, Weiner C, Weisser W, Wells K, Werner M, Wilcke W, Manning P. The supply of multiple ecosystem services requires biodiversity across spatial scales. *Nature Ecology & Evolution*, 2022, 7(2): 236-249.
- [35] Zhang H P, Liu S. Exploring the spatial-temporal patterns of urban ecosystem service relationships and their driving mechanisms: a case study of Wuhu City, China. *Ecological Indicators*, 2024, 167: 112726.
- [36] Wang C, Wang S, Fu B J, Li Z S, Wu X, Tang Q. Precipitation gradient determines the tradeoff between soil moisture and soil organic carbon, total nitrogen, and species richness in the Loess Plateau, China. *Science of The Total Environment*, 2017, 575: 1538-1545.
- [37] 荀斌, 郑莹, 范蓉, 郝蕊芳, 刘宝印. 陕西省生态系统服务权衡/协同关系阈值识别. 生态学报, 2024, 44(17): 7431-7444.
- [38] 乐荣武, 李巍, 周思杨, 宋南奇. 呼包鄂榆城市群生态系统服务价值驱动因素及其交互效应. 生态学报, 2023, 43(23): 9967-9980.
- [39] Wu X T, Wang S, Fu B J, Feng X M, Chen Y Z. Socio-ecological changes on the Loess Plateau of China after grain to green program. *Science of The Total Environment*, 2019, 678: 565-573.
- [40] 段宝玲, 冯强, 原燕燕, 李鹏晖. 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. 旅游科学, 2021, 35(5): 11-31.
- [41] Zhang B Q, Tian L, Yang Y T, He X G. Revegetation does not decrease water yield in the Loess Plateau of China. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(9): e2022GL098025.