

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2026.07.013

杨佳, 刘洪娜, 刘小艳. 湘江流域生态系统服务权衡/协同及驱动因素 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2026, 48(7): 164-176.

湘江流域生态系统服务权衡/协同及驱动因素

杨佳¹, 刘洪娜^{1,2}, 刘小艳¹

1. 中南林业科技大学 生态环境学院, 湖南 长沙 410004; 2. 南方林业生态应用技术国家工程实验室, 湖南 长沙 410004

摘要: 湘江流域作为长江中游重要的经济发展区域, 探究流域内不同生态系统服务间的权衡/协同关系及其驱动因素, 对于保障区域生态安全、推动可持续发展具有至关重要的意义。基于 CASA、InVEST、RUSLE 模型等评估了 2000、2010、2020 年湘江流域碳固存、水源涵养、土壤保持、粮食生产 4 种生态系统服务的时空分布特征, 通过 Spearman 相关性分析得出不同生态系统服务之间的权衡/协同关系, 并采用 XGBoost+SHAP 模型探究了影响权衡/协同关系的关键因子。结果表明: ① 碳固存、土壤保持在流域东南部和南部区域呈现出总体增长趋势, 而粮食生产呈现出北部轻微减少、中南部区域轻微增加的变化趋势; 水源涵养量空间变化较大, 整体表现为中部明显下降, 西北部增加; ② 生态系统服务关系呈现权衡/协同并存的空间格局。其中生态调节服务之间以协同关系为主, 显著协同区主要集中在南部、东南部区域, 而粮食生产与其他 3 项服务之间则以权衡关系为主, 显著权衡主要分布在北部洞庭湖平原区域; ③ XGBoost+SHAP 模型表明, 耕地面积占比、海拔是影响生态系统服务权衡/协同关系变化的重要驱动因素; 人口密度和建设用地扩张等人为活动会在一定程度上加剧服务间的权衡关系, 但总体影响较小。

关键词: 生态系统服务; 权衡/协同; 驱动因素; XGBoost+SHAP 模型; 湘江流域

中图分类号: X321; X171.1

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2026)07-0164-13

Trade-offs and synergies of ecosystem services and their driving factors in the Xiangjiang River Basin

Yang Jia¹, Liu Hongna^{1,2}, Liu Xiaoyan¹

1. School of Ecology and Environment, Central South University of Forestry and Technology, Changsha Hunan 410004, China;

2. National Engineering Laboratory of Applied Technology for Forestry and Ecology in South China, Changsha Hunan 410004, China

Abstract: As the Xiangjiang River Basin is a key economically developed region in the middle reaches of the

收稿日期: 2026-01-13

基金项目: 湖南省教育厅科学研究优秀青年项目(23B0242)。

作者简介: 杨佳, 硕士研究生, 主要从事生态系统服务研究。

通信作者: 刘洪娜, 讲师。

Yangtze River, exploring the trade-offs and synergies among different ecosystem services and their driving factors within the Xiangjiang River Basin is of critical importance for safeguarding regional ecological security and promoting sustainable development. This study assessed the spatiotemporal distribution characteristics of four ecosystem services, namely carbon sequestration, water conservation, soil retention, and grain production, in the Xiangjiang River Basin in 2000, 2010 and 2020 based on the CASA, InVEST and RUSLE models. The trade-offs and synergies among ecosystem services were analyzed by Spearman correlation analysis, and key driving factors influencing the trade-offs and synergies were explored by the XGBoost model combined with SHAP (SHapley Additive exPlanations) analysis. The results indicated that: ① Carbon sequestration and soil retention were generally higher in the southeastern and southern parts of the basin, while food production showed a slight decreasing trend in the northern region and a marginal increasing trend in the central-southern area. Water conservation displayed considerable spatial variation, with an overall pattern of marked declining trend in the central region and an increasing trend in the northwestern region. ② Ecosystem service relationships showed a spatial pattern in which trade-offs/synergies coexisted. Synergies predominated among ecological regulation services, with the significant synergy areas primarily clustered in southern and southeastern regions. Conversely, trade-offs dominated between grain production and the other three services, with significant trade-off mainly distributed in the Dongting Lake Plain of the northern basin. ③ As demonstrated by the XGBoost+SHAP model, the proportion of cultivated land area and elevation were the key driving factors influencing the changes in trade-offs/synergies of Xiangjiang River Basin. Population density and built-up land expansion, among other human activities, intensified the trade-offs among ecosystem services to some extent, but their overall impact remained limited.

Key words: ecosystem services; trade-offs/synergies; driving factors; XGBoost + SHAP model; Xiangjiang River Basin

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取的利益,主要包括供给服务、调节服务、支持服务和文化服务^[1-3],对维持人类福祉具有至关重要的作用^[4]。然而,全球尺度的研究表明,由于人类活动强度的不断加大以及对自然资源的过度开发和利用,在过去的十几年间,生态系统服务的总价值下降了约 40%,并且有超过一半的生态系统服务正处于退化状态^[5]。同时,He 等^[6]也在研究中指出,长江经济带的主要生态系统服务存在不均匀退化的显著挑战。因此,开展生态系统服务评估,对区域可持续发展和提升社会福祉具有重要的参考意义。

生态系统服务间的权衡/协同效应是自然—社会耦合系统中多要素互馈作用的时空映射^[7-8],受自然过程(如气候波动、地貌演化)和人文活动(如土地开发强度、政策干预)的双重调制,极大程度上影响了区域可持续发展^[9]。此前研究常通过相关性分析^[10]、聚类分析^[11]、回归分析^[12]等方法量化和可视化生态系统服务权衡/协同关系,如王启名等^[13]基于双变量空间自相关、冗余分析,探究了滇池流域水文生态系统服务时空分布及权衡/协同关系。孙才志等^[14]基于相关性分析、空间自相关分析,揭示了辽河流域产水量、生境质量、碳储量、土壤保持 4 种典型生态系统服务权衡/协同关系。此外,生态系统服务及生态系统服务权衡/协同关系的驱动机制研究也一直是生态学热点,其主要通过主成分降维^[15-16]、结构方程建模^[17]、地理探测器^[18]及随机森林模型^[19]等经典方法,识别生态系统服务权衡/协同关系对自然因素和人类社会因素的响应。如冉璇等^[20]发现人类活动是钱江源国家公园生态系统服务变化的关键因素。Zhao 等^[21]发现湿地面积是黄河三角洲生态系统服务价值的首要驱动因素。荔童等^[22]基于贝叶斯网络,揭示土地利用、降水和 NPP 是黄土高原生态系统服务权衡/协同关系的主要驱动因子。然而,传统模型在应对高维数据降噪、非

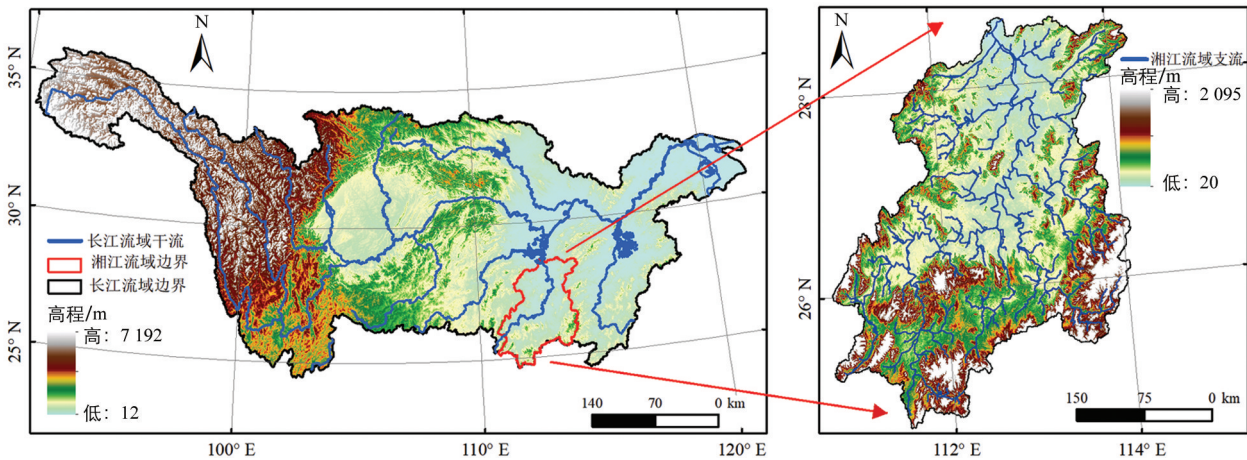
线性响应解析及变量贡献度量化等复杂场景时仍存在明显的局限性, 尤其对生态系统要素间非线性互馈作用的表征能力存在系统性缺失^[23]。在此背景下, XGBoost 算法凭借其正则化集成学习框架, 能够有效处理高维变量、非线性关系及复杂特征交互。结合 SHAP 方法, 可进一步量化驱动因子的相对贡献和作用方向, 从而提高模型解释性^[24]。因此, 采用 XGBoost+SHAP 方法解析生态系统服务权衡/协同关系的驱动机制, 有助于识别关键影响因素, 并为缓解服务权衡关系、增强服务协同提供科学依据。

湘江流域作为长江中游生态核心区, 其地形复杂多样、高强度农业开发与快速城市化引发了植被覆盖度下降、水土流失加剧及生态系统服务功能系统性衰减等问题。因此, 识别该区域生态系统服务空间分布、权衡/协同关系及驱动因素对制定区域生态管理措施、推动区域可持续发展至关重要。然而, 当前针对湘江流域的生态系统服务权衡/协同关系及驱动因子的研究相对缺乏。已有研究主要集中在评估湘江流域整体环境质量^[25]和生态安全格局^[26]等方面。因此本研究基于 CASA、InVEST、RUSLE 等模型, 评估 2000、2010、2020 年碳固存、水源涵养、土壤保持、粮食生产 4 种生态系统服务及其权衡/协同关系, 并引入 XGBoost+SHAP 模型, 定量解析自然与社会因素对权衡/协同关系的影响, 旨在为湘江流域制定针对性生态管理、生态修复策略及可持续管理提供科学依据。

1 研究区概况与数据处理

1.1 研究区概况

湘江流域(24.33°–29.50°N, 111.50°–114.50°E)主要分布于湖南省、广东省和广西壮族自治区交界处, 总面积约为 95 474 km²(图 1)。湘江流域属于亚热带季风气候区, 年降雨量为 1 000 ~1 400 mm, 年平均温度为 14~19 °C, 平均海拔为 329.2 m, 地势呈由南向北逐渐降低的趋势, 土壤类型以红壤和黄壤为主, 植被类型丰富, 以常绿阔叶林为主。湘江流域涵盖广东省连山壮族瑶族自治县、广西壮族自治区的全州县、灌阳县以及湖南省的长沙县、湘潭县、祁东县等 69 个县级行政区。截至 2020 年, 湘江流域湖南段人口数为 3 713.34 万人, 占湖南省人口总数的 55.88%, 城镇化水平为 63.16%^[27], 是湖南省人口最稠密、经济最发达的地区。



审图号: GS(2024)0650 号, 下同。

图 1 湘江流域地理区位

1.2 数据来源与预处理

① 土地利用数据(2000、2010、2020 年)来源于国家地球系统科学数据中心(<https://www.geodata.cn/>), 分辨率为 30 m, 共划分为耕地、林地、灌木林地、草地、水域、未利用地、建设用地七大类; ② 气象数据包括降水、温度、太阳辐射等, 数据来源于国家气象信息中心(<https://data.cma.cn/>), 通过普通克里金插值方法进行空间化处理, 空间分辨率为 100 m; ③ 潜在蒸散发数据(2000–2020 年)来源于国家地球系统科学数据中心(<https://www.geodata.cn/>), 分辨率为 1 km, 通过线性插值降低分辨率

至 100 m; ④ 地表高程(DEM)数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/>), 分辨率为 30 m; ⑤ 核标准化植被指数(kernel Normalized Difference Vegetation Index, kNDVI)在中分辨率成像光谱仪(MODIS/061/MOD13Q1)中获取, 该数据涵盖了 2000 年 2 月至 2020 年 12 月时间段, 分辨率为 250 m; ⑥ 人口密度来源于 LandScan 人口密度数据集(<https://landscan.ornl.gov/>), 分辨率为 1 km; ⑦ 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/>), 分辨率为 500 m。⑧ 渔网数据根据泰森多边形原理, 在 ArcGIS 中根据湘江流域边界建立 5 km 六边形渔网。

2 研究方法

2.1 生态系统服务评估方法

湘江流域作为典型的经济密集区和人地矛盾突出区域, 其生态系统服务管理需优先聚焦在与区域发展核心需求紧密关联的供给与调节服务上, 以解决当前最紧迫的“发展—保护”矛盾。因此, 本研究选取粮食生产(供给服务)和碳固存、土壤保持、水源涵养(调节服务)作为研究对象^[28]。粮食生产保障区域粮食安全, 碳固存、土壤保持与水源涵养则分别响应减缓气候变化、控制水土流失及缓解水资源短缺的核心生态挑战, 以此系统揭示流域内经济发展与生态保护间的权衡/协同机制^[22]。

2.1.1 粮食生产

粮食生产是自然生态系统服务中最重要的供给服务之一, 对人类生产生活至关重要, 本研究主要在县域粮食统计年鉴的基础上, 采用归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)校正法将县域粮食重新分配至栅格尺度^[29]。公式如下:

$$FP_x = \frac{NDVI_x}{NDVI_{mean,i}} \times FP_{sum,i} \quad (1)$$

式中: FP_x 为栅格单元 x 的粮食产量(t/km^2); $FP_{sum,i}$ 为县域粮食产量; $NDVI_x$ 为单个栅格单元 x 的 NDVI; $NDVI_{mean,i}$ 为县域 i 耕地的 NDVI 平均值。

2.1.2 碳固存

植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)反映了植被群落的生产能力和生态过程, 对调节全球碳平衡、增强生态服务功能具有重要的意义, 本研究基于 CASA 模型^[30]对湘江流域的 NPP 进行计算, 表征生态系统碳固存能力。公式如下:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \epsilon(x, t) \quad (2)$$

式中: $NPP(x, t)$ 为像元 x 在第 t 个月的净初级生产力 $[g/(m^2 \cdot a)]$; $APAR(x, t)$ 为吸收的光合有效辐射(MJ/m^2); $\epsilon(x, t)$ 是像元 x 在第 t 个月的实际光合利用效率(g/MJ)。

2.1.3 土壤保持

土壤保持指潜在土壤侵蚀和实际侵蚀之间的差异, 在维护生态系统功能、保护土地资源、促进可持续发展等方面发挥着重要作用。本研究使用修订的通用土壤流失方程(Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE)计算土壤侵蚀量^[31], 公式如下:

$$SR = R \times K \times L \times S \times (1 - C \times P) \quad (3)$$

式中: SR 为土壤保持量(t/hm^2); R 为降雨侵蚀力因子 $[MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h)]$; K 为土壤可蚀性因子 $[t \cdot hm^2 \cdot h/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)]$; L 、 S 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; L 、 S 、 C 、 P 均为无量纲因子。

2.1.4 水源涵养

本研究基于 InVEST 模型的产水量模块计算产水量, 进一步结合径流系数及地形指数等计算水源涵养量。公式如下^[32]:

$$WY = \left(1 - \frac{AET_x}{P_x}\right) \times P_x \quad (4)$$

$$WR = \min(249/V, 1) \times \min(1, 0.9 \times TI/3) \times \min(1, K/300) \times WY$$

(5)

式中: WY 为产水量(mm); AET_x 为栅格 x 的年实际蒸散发(mm/a); P_x 为年降雨量(mm); WR 为水源涵养量(mm); V 为流域内各地类的径流流速系数, 流速系数通过查阅参考文献[29]获得; TI 为地形指数, 通过流域 DEM 计算得到, 为常量; K 为土壤饱和导水率。

2.2 数据分析方法

2.2.1 生态系统服务权衡计算

Spearman 相关性分析通常用来量化不同变量之间的相互关系及强度^[10], 本研究以栅格为统计单元, 采用相关性分析得出研究区 2000、2010、2020 年 4 种生态系统服务在空间上的权衡/协同关系, 公式如下:

$$R_{xy,Z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2)(1 - r_{yz}^2)}}$$

(6)

式中: r_{xy} 为变量 X 和 Y 之间的简单相关系数; r_{xz} 是变量 X 和控制变量 Z 之间的简单相关系数; r_{yz} 是变量 Y 和控制变量 Z 之间的简单相关系数。若 $R > 0$, 表明两种生态系统服务间为协同关系, 若 $R < 0$, 则表明两种生态系统服务间呈权衡关系。此外, 当 $p > 0.05$ 时, 相关性较弱; 当 $p < 0.05$ 时, 相关性显著; 当 $p < 0.01$ 时, 相关性极显著。

2.2.2 权衡驱动因子分析

极端梯度提升决策树(eXtreme Gradient Boosting, XGBoost)通过迭代训练多棵弱决策树(如 CART), 每棵树学习前序模型的残差, 最终以加权投票或累加预测值的方式提升整体模型精度, 与 SHAP(SHapley Additive exPlanations)的结合是一种将高性能机器学习算法与可解释性框架融合的先进方法, 其核心优势在于精准预测能力与透明决策解释的有机统一, 具体公式详见赵慧等^[33]的研究。在本研究中, 主要选取了 4 项自然因子和 4 项人类干扰因子(表 1), 探究生态系统服务权衡/协同关系对驱动因子变化的响应。生态学研究, 空间分析单元的选择直接影响研究结果的准确性。传统的方形网格存在几何畸变和方向偏差等局限性, 而六边形网格在空间离散中具有较低的采样偏差和更均匀的邻域结构, 有助于减少方向性误差^[34], 已成为生态学研究中的一种新方法。

表 1 湘江流域生态系统服务权衡/协同关系的驱动因子

因子类型	因子名称	因子符号	选择依据 ^[35-36]
自然因子	海拔	DEM	海拔是影响生态系统服务的重要自然因素, 不同海拔的气候条件和植被类型差异显著, 对生态系统服务功能产生直接影响。
	降雨	PCP	降雨是生态系统服务的关键驱动因素, 直接影响水源涵养、土壤保持和植被生长。
	温度	TEM	温度对生态系统服务功能有显著影响, 尤其在碳固存和植被生长方面。
	核标准化植被指数	kNDVI	核标准化植被指数是衡量生态系统服务功能的重要指标, 能够反映植被的覆盖度和生产力, 对碳固存和土壤保持有直接影响。
人类干扰因子	耕地面积占比	GD	耕地面积占比是人类活动对生态系统服务影响的重要指标, 农业活动可能导致土壤侵蚀和生态系统服务功能下降。
	建设用地面积占比	JSYD	建设用地面积占比反映了人类活动对土地利用的改变, 城市化会降低生态系统服务功能。
	人口密度	PP	人口密度是衡量人类活动对生态系统服务影响的重要指标, 高人口密度区域通常生态系统服务功能较低。
	夜间灯光指数	NTR	夜间灯光指数是人类活动强度的代理指标, 能够反映城市化和工业化对生态系统服务的影响。

图 2 湘江流域土地利用类型空间分布

3.2 生态系统服务功能时空变化

2000、2010、2020 年间, 湘江流域粮食生产、碳固存、水源涵养、土壤保持呈现显著空间异质性, 并与土地利用覆盖空间分布高度耦合(图 3)。

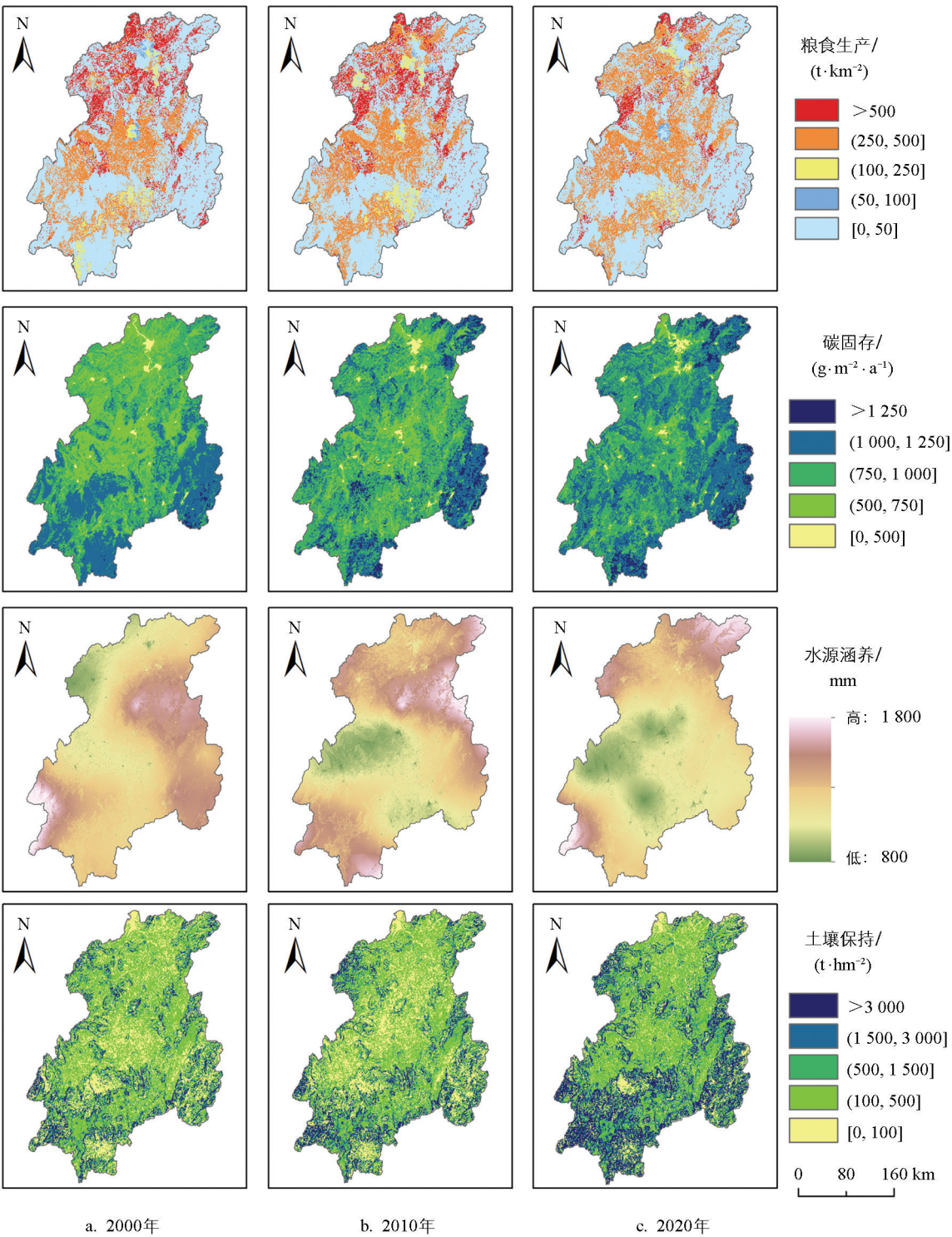


图 3 2000—2020 年湘江流域生态系统服务空间分布图

粮食生产多年均值为 67.98 t/km^2 , 北部受城市化和退耕还林影响表现为显著下降趋势, 南部因低山丘陵耕地扩张呈上升趋势, 空间上呈“北高南低”梯度分布, 高值区主要位于北部洞庭湖平原, 粮食产量 $>200 \text{ t/km}^2$, 低值区 ($<50 \text{ t/km}^2$) 则位于南部中高山。水源涵养量多年均值为 1271.88 mm , 受当年降水量及温度的扰动较大, 其时空变异最为明显, 呈现“中心低、四周高”的圈层分布, 高值区位

于流域东北部、西南部山区，低值区集中于中部河谷平原区。碳固存多年均值为 $922.89\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ，并在研究期内呈持续上升态势。其空间格局具有显著的“南高北低”特征，高值区主要分布于植被覆盖度较高($>70\%$)的东部和南部山区，包括雪峰山、南岭北麓和武陵山等地[$>1\,000\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$]。相比之下，北部长株潭城市群受快速城市化扩张影响，植被覆盖度下降，形成碳固存低值区[$<500\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$]；土壤保持多年均值为 $1\,118.73\text{ t}/\text{hm}^2$ ，整体呈缓慢增长趋势。土壤保持呈“北低南高”带状分布，高值区($>3\,000\text{ t}/\text{hm}^2$)位于南部及东南部高覆盖林地丘陵区，低值区($<500\text{ t}/\text{hm}^2$)分布在湘江北部平原，其空间分布与碳固存一致，主要得益于高覆盖林地的截留拦蓄功能。

3.3 生态系统服务权衡/协同关系

基于 R 中 corrplot 包的 Spearman 相关性分析(双尾检验, $p<0.01/p<0.05$ 分别界定极显著/显著区)量化了湘江流域生态系统服务的权衡/协同关系并进行空间可视化(图 4)，通过 ArcGIS 对不同分区面积进行统计(表 3)。研究结果表明：粮食生产—碳固存/土壤保持/水源涵养均以权衡关系为主导，体现“人类活动—自然服务”冲突格局。粮食生产—碳固存显著权衡区(21.29%)主要分布于北部及中部城市扩展带与平原农垦区，显著协同区(18.16%)集中于西南部低山丘陵，反映城镇化、农业与高植被覆盖对碳汇的差异化影响；粮食生产—土壤保持显著权衡区(11.22%)与 $\geq 25^\circ$ 陡坡耕地高度耦合，揭示中高海拔、陡坡地的农业扩张可能会加剧水土流失；粮食生产—水源涵养显著权衡区(20%)与粮食高产带重叠，表明高强度农业会削弱水文调节能力。

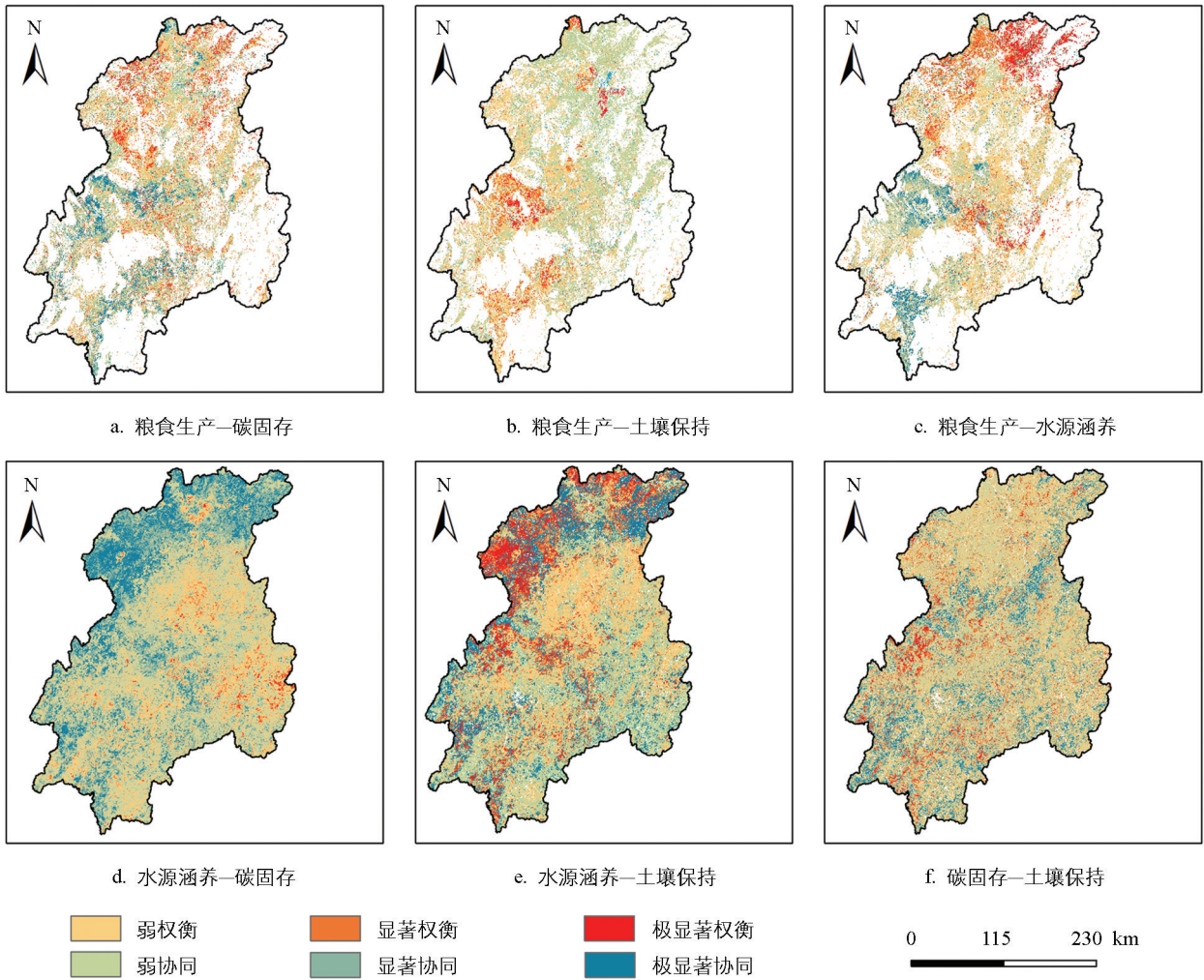


图 4 湘江流域生态系统服务权衡/协同关系空间分布图

生态调节型服务间则呈现显著正向关联。水源涵养—碳固存强协同(33.80%), 主要分布于北部及流域边缘平缓区, 表明森林、草地具有高水源涵养与固碳功能, 但协同强度随海拔升高而降低; 水源涵养—土壤保持空间异质性显著, 显著权衡区(16.44%)与粮食高产区高度耦合, 显著协同区(24.77%)与粮食低产区重叠, 反映人类活动会加剧自然生态系统服务间的权衡效应; 碳固存—土壤保持显著协同区(27.19%)主要分布于低山丘陵林地, 原因在于高覆盖植被有利于截留降水、固土及有机质的积累且较低的海拔降雨冲刷力较小, 而显著权衡区(10.8%)主要位于南部高海拔区域以及受人类扰动较大的坡耕地区域。

表 3 湘江流域不同生态系统服务权衡/协同面积统计占比

面积占比/ %	弱权衡 ($0.05 < p < 1$)	显著权衡 ($p < 0.05$)	极显著权衡 ($p < 0.01$)	极显著协同 ($p < 0.01$)	显著协同 ($p < 0.05$)	弱协同 ($0.05 < p < 1$)
粮食生产—碳固存	30.45	12.48	8.81	6.59	11.57	30.09
粮食生产—土壤保持	43.52	8.02	4.20	1.28	6.22	36.76
粮食生产—水源涵养	32.77	12.61	7.39	6.46	12.00	28.77
水源涵养—碳固存	19.65	2.53	0.79	13.71	20.09	43.23
水源涵养—土壤保持	25.30	9.62	6.82	11.77	13.00	33.49
碳固存—土壤保持	29.83	7.89	2.91	12.13	15.06	32.18

3.4 生态系统服务权衡/协同关系驱动因子分析

本研究基于 XGBoost+SHAP 模型, 揭示了湘江流域生态系统服务权衡/协同关系对社会—自然驱动因素的响应(图 5)。结果表明, 耕地面积占比和海拔是影响湘江流域生态系统服务权衡/协同的关键驱动因子(均位于因子重要性排序前四位)。根据蜂群图结果, 高耕地面积占比通过替代林草地, 降低植被覆盖度和景观连通性进一步加剧粮食生产与调节服务的权衡效应(SHAP 值为 $-0.60 \sim 0.10$), 耕地面积占比越大, 权衡效应越明显; 中高海拔区域($DEM > 500\text{ m}$)对生态系统服务的协同关系具有显著的正向贡献(SHAP 值为 $0.10 \sim 0.30$), 原因在于该区域植被类型以森林为主且具有较低的气温和较高的湿度, 有利于植被的生长和土壤的保持。kNDVI 是碳固存相关的服务关系中的重要驱动因子(位于因子重要性排序前三位), 高 kNDVI 在碳固存—土壤保持、水源涵养—碳固存中主要表现为正向驱动作用(SHAP 值为 $0.10 \sim 0.50$), 而在粮食生产—碳固存中则表现为负向驱动作用(SHAP 值为 $-0.40 \sim 0$)。降水与温度(SHAP 值为 $0.10 \sim 0.40$)可能通过影响植被生长、蒸散和土壤水分过程调节, 促进与水源涵养相关关系的协同效应。此外, 夜间灯光指数、建设用地面积占比(平均|SHAP 值| < 0.1)等人类干扰因子在因子重要性排序中均为低位。

4 讨论与结论

4.1 讨论

厘清生态系统服务权衡/协同对自然环境与人类干扰的响应, 有助于深化对其动态转化过程的认知, 从而为制定科学的土地利用管理政策提供可参考的依据。湘江流域海拔呈由南向北递减, 林地集中分布在南部、东部及流域边缘海拔较高的区域, 农田、建设用地主要分布在北部的洞庭湖平原, 因此水源涵养、碳固存、土壤保持高值区集中在南部、东南部区域, 粮食生产高值区分布在北部及中部区域, 这与刘俊宇^[37]在湘江流域的研究结果一致。湘江流域生态系统服务权衡/协同关系的空间异质性主要受土地利用强度和空间分布的影响。粮食生产—碳固存/土壤保持/水源涵养呈现显著的权衡关系, 这与农业集约化导致的自然植被退化密切相关, 与 Foley 等^[38]提出的“农业扩张—生态功能衰减”研究结论一致。湘江流域北部区域因耕地扩张和城市蔓延, 导致林地碎片化, 进而使得碳固存和水源涵养功能显著下降, 反映了快速土地利

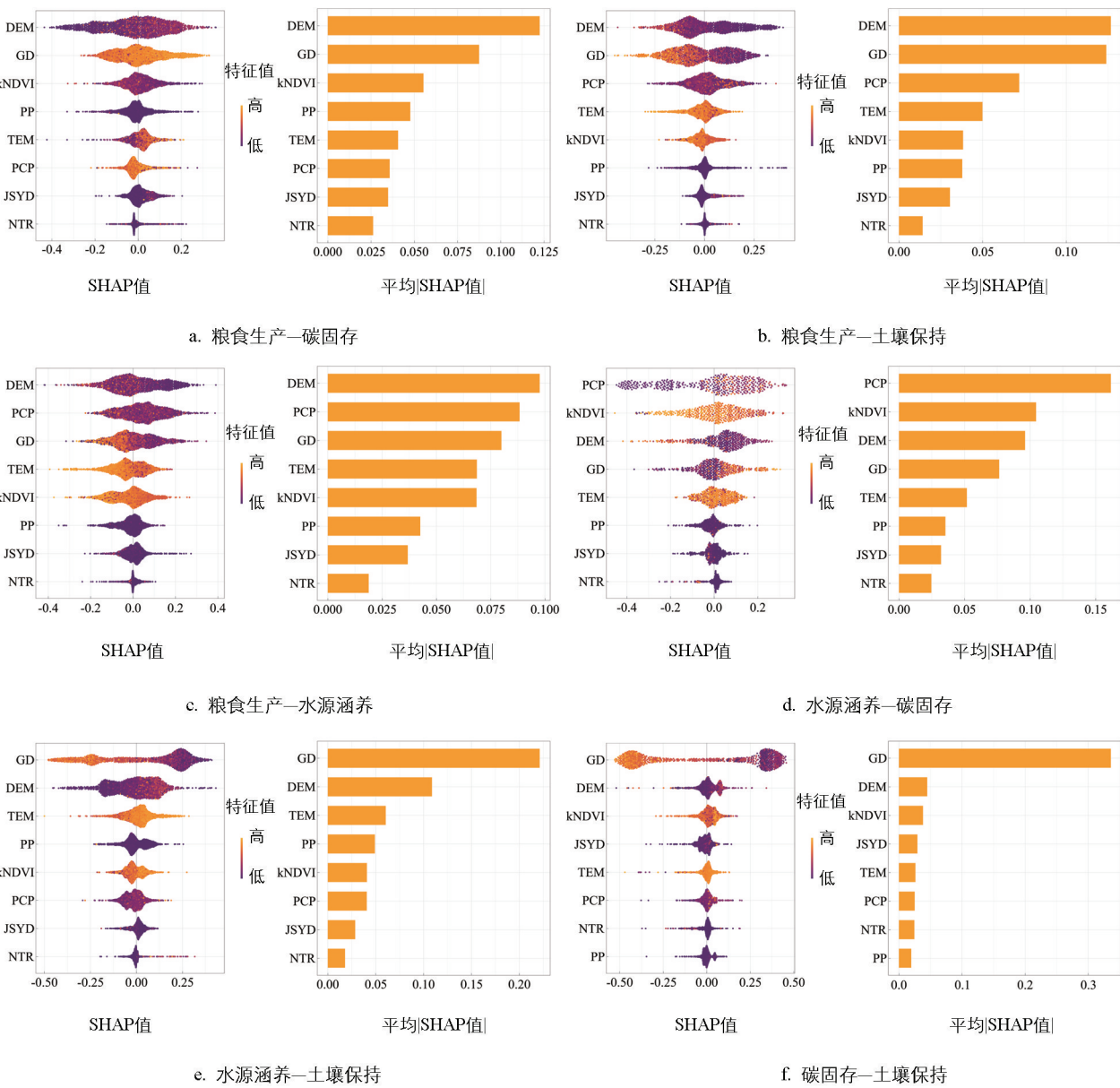


图 5 湘江流域生态系统服务权衡/协同驱动因子依赖图及重要性排序

用变化与生态系统服务功能之间存在显著权衡关系^[39-40]，进一步印证了“人类活动—生态服务非线性衰减”理论。而生态调节服务间呈现协同效应则主要源于森林、草地生态系统的多功能耦合特性，表明这些生态系统在提供多种生态服务时，能够通过内部功能的相互作用和协同增效，实现服务之间的正向反馈和优化组合，从而在整体上提升生态系统的功能稳定性和服务供给能力^[41-42]。此外，丘陵和山地区域的坡耕地使粮食生产与土壤保持之间的权衡更加显著，呈现出“地形—管理交互效应”，即地形条件与农业之间的相互作用加剧了水土流失。这一发现与韩磊等^[43]在黄土高原的研究结论一致，表明退耕还林还草（特别是坡耕地退耕还林还草）等生态管理措施是缓解服务权衡的关键措施。

本研究采用 XGBoost+SHAP 模型，识别和量化不同驱动因素对生态系统服务权衡/协同关系的影响程度，有助于深入探究生态系统服务关系的变化机制。结果表明，耕地面积占比是调控服务间相互作用的核心驱动因子，其作用强度与方向受地形梯度、土地利用强度及生态系统结构异质性的共同影响。这是由于大面积的耕地开发通常伴随着自然植被的减少和生态系统结构的简化^[44]，从而削弱了生态系统服务之间的协同效应，导致权衡关系的加剧。在自然因素中，海拔对生态系统服务的协同与权衡关系

具有显著的调节作用。一般而言, 海拔越高的区域, 植被覆盖率越高且植被类型越丰富, 这有利于碳固存和水源涵养, 使二者呈现出协同关系。然而, 海拔越高也意味着坡度越大, 陡坡区域更容易发生水土流失, 从而降低土壤保持和碳固存的能力。因此, 在海拔 500~1 000 m 时^[45-46], 土壤保持、碳固存、水源涵养能呈现出显著协同关系。此外, 水源涵养—碳固存、水源涵养—土壤保持关系中, 降水、温度、植被指数和海拔是驱动权衡/协同关系变化的主要因素, 表明在这一特定的生态系统服务关系中, 气候条件和植被覆盖对生态系统服务的协同或权衡关系起到了重要的调节作用^[47]。在多种生态系统服务权衡/协同关系中, 夜间灯光指数和建设用地面积占比的影响力相对较小, 表明城市化进程加快、建设用地面积有所增加, 但其在生态系统服务权衡/协同关系中的整体影响仍然有限。这可能是因为城市化和建设用地扩张主要集中在局部区域, 且其对生态系统服务的影响具有一定的滞后性, 因此在当前的时间尺度上尚未表现出显著的驱动作用^[48]。然而, 这并不意味着城市化和建设用地扩张对生态系统服务没有影响, 其潜在的长期影响仍需进一步关注和研究。

4.2 结论

本研究通过量化湘江流域生态系统服务的时空演变及权衡/协同的关键驱动因子, 得出以下结论:

1) 2000—2020 年, 碳固存、水源涵养、土壤保持整体呈现出增加趋势, 三者空间分布相对一致, 流域南部及东部区域供给能力相较其他区域强, 由北向南呈现出递增趋势; 粮食生产在北部平原区轻微下降, 在南部低山丘陵区呈增加趋势。

2) 6 对生态系统服务关系在空间上均呈现权衡/协同关系并存的特征。其中水源涵养—碳固存、水源涵养—土壤保持、碳固存—土壤保持以协同作用为主, 主要集中在南部、东南部区域; 而粮食生产—碳固存、粮食生产—土壤保持、粮食生产—水源涵养以权衡效应为主, 分布在北部洞庭湖平原及坡耕地区域。

3) 耕地面积占比和海拔是调控服务间权衡/协同关系的核心驱动因子。耕地扩张会显著增强权衡效应; 中高海拔区域可以维持碳固存、土壤保持与水源涵养之间的协同关系, 降水、温度与植被是水源涵养相关服务的关键因子。受空间局部性与时间滞后性限制, 夜间灯光指数与建设用地占比对当前服务关系的驱动较弱, 但其长期生态效应需持续监测。

因此, 优化耕地空间布局、保留关键海拔带植被完整性、加强陡坡水土保持工程, 是缓解服务权衡关系、提升协同的关键路径。

参考文献:

- [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] 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.
- [3] 邱坚坚, 刘毅华, 陈澄静, 等. 生态系统服务与人类福祉耦合的空间格局及其驱动方式: 以广州市为例 [J]. *自然资源学报*, 2023, 38(3): 760-778.
- [4] 陈新云, 王甜, 李宝健. 北京市西北部生态涵养区未来土地利用及生态系统服务变化情景模拟 [J]. *西北林学院学报*, 2021, 36(1): 86-95.
- [5] Costanza R, De Groot R, Sutton P, et al. Changes in the global value of ecosystem services [J]. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152-158.
- [6] He L J, Xie Z Y, Wu H Q, et al. Exploring the interrelations and driving factors among typical ecosystem services in the Yangtze River economic Belt, China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 351: 119794.
- [7] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 黄河流域生态系统服务权衡协同关系时空异质性 [J]. *中国沙漠*, 2021, 41(6): 78-87.
- [8] Zhou J, Yang J, Tang Z S, et al. Driving mechanisms of ecosystem services and their trade-offs and synergies in the

- transition zone between the Qinghai-Tibet Plateau and the Loess Plateau [J]. *Ecological Indicators*, 2025, 171: 113148.
- [9] Chen T Q, Feng Z, Zhao H F, et al. Identification of ecosystem service bundles and driving factors in Beijing and its surrounding areas [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 711: 134687.
- [10] 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.
- [11] 孙艺杰, 任志远, 赵胜男, 等. 陕西河谷盆地生态系统服务协同与权衡时空差异分析 [J]. *地理学报*, 2017(3): 521-532.
- [12] Raudsepp-Hearne C, Peterson G D, Bennett E M, et al. Ecosystem service bundles for analyzing tradeoffs in diverse landscapes [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(11): 5242-5247.
- [13] 王启名, 杨昆, 李立晓, 等. 滇池流域水文生态系统服务权衡与协同时空异质性及其归因分析 [J]. *生态学报*, 2023, 43(12): 4876-4891.
- [14] 孙才志, 于涵, 郝帅. 辽河流域生态系统服务权衡-协同效应及其驱动因素 [J]. *生态学报*, 2025, 45(6): 2952-2967.
- [15] Yang G F, Ge Y, Xue H, et al. Using ecosystem service bundles to detect trade-offs and synergies across urban-rural complexes [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 136: 110-121.
- [16] Li B Y, Chen N C, Wang Y C, et al. Spatio-temporal quantification of the trade-offs and synergies among ecosystem services based on grid-cells: a case study of Guanzhong Basin, NW China [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 94: 246-253.
- [17] 张颖, 王旭红, 冯子豪, 等. 基于 SEM 模型的热环境时空特征及影响因素分析: 以西安都市圈为例 [J]. *环境科学*, 2024, 45(6): 3734-3745.
- [18] 王鹏, 刘小鹏, 王亚娟, 等. 黄土丘陵沟壑区生态移民过程及其生态系统服务价值评价: 以宁夏海原县为例 [J]. *干旱区地理*, 2019, 42(2): 433-443.
- [19] 魏伟, 曾诗瑶, 尹力, 等. 近 40 年海南岛国土空间格局演化的生态效应及其影响因素 [J]. *生态学报*, 2024, 44(12): 5083-5101.
- [20] 冉璇, 李渊, 郭宇龙, 等. 基于 InVEST 模型的钱江源国家公园生态系统服务评估及权衡协同关系研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(9): 1932-1948.
- [21] Zhao Y H, Luo L, Zhang L, et al. Spatiotemporal evolution and driving forces of ecosystem service values in the Yellow River Delta [J]. *Ecological Indicators*, 2025, 173: 113432.
- [22] 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.
- [23] Tian Y C, Zhang Q, Tao J, et al. Use of interpretable machine learning for understanding ecosystem service trade-offs and their driving mechanisms in karst peak-cluster depression basin, China [J]. *Ecological Indicators*, 2024, 166: 112474.
- [24] Yuan Y Y, Guo W, Tang S Q, et al. Effects of patterns of urban green-blue landscape on carbon sequestration using XGBoost-SHAP model [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 476: 143640.
- [25] 邓楚雄, 彭勇, 李科, 等. 基于生产-生态-生活空间多情景模拟下的流域土地利用转型及生态环境效应 [J]. *生态学杂志*, 2021, 40(8): 2506-2516.
- [26] 刘春早, 黄益宗, 雷鸣, 等. 湘江流域土壤重金属污染及其生态环境风险评价 [J]. *环境科学*, 2012, 33(1): 260-265.
- [27] 刘卯丑. 湘江流域近 30 年景观格局演变及生态廊道模拟重建与优化 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2022.
- [28] Xu X B, Yang G S, Tan Y, et al. Ecosystem services trade-offs and determinants in China's Yangtze River Economic Belt from 2000 to 2015 [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 634: 1601-1614.
- [29] 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: 108845.
- [30] 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.

[31] 黄梦思, 阎建忠, 吴雅, 等. 西南高山峡谷区水土保持变化及驱动因素分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(11): 121-135.

[32] 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.

[33] 赵慧, 刘茜, 张敏, 等. 基于 XGBoost-SHAP 模型的北京市生态系统服务空间格局及驱动因素分析 [J]. 环境科学, 2026, 47(2): 1025-1037.

[34] Birch C P D, Oom S P, Beecham J A. Rectangular and hexagonal grids used for observation, experiment and simulation in ecology [J]. Ecological Modelling, 2007, 206(3/4): 347-359.

[35] 刘东岳, 董文卓, 勾容, 等. 重庆三峡库区耕地利用绿色转型时空格局及驱动因素研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(7): 143-156.

[36] 谭永滨, 谢剑亮, 冉江华, 等. 基于 RUSLE 的鄱阳湖流域土壤侵蚀时空特征及影响因素分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(9): 46-56.

[37] 刘俊宇. 湘江流域人类干扰强度变化对生态系统服务的影响及阈值研究 [D]. 长沙: 湖南师范大学, 2021.

[38] Foley J A, DeFries R, Asner G P, et al. Global consequences of land use [J]. Science, 2005, 309(5734): 570-574.

[39] 胡凯群, 林美霞, 吝涛, 等. 快速城镇化过程中的城市蔓延与生态保护冲突空间识别与量化评估: 以长三角生态绿色一体化发展示范区为例 [J]. 生态学报, 2022, 42(2): 462-473.

[40] 柯新利, 唐兰萍. 城市扩张与耕地保护耦合对陆地生态系统碳储量的影响: 以湖北省为例 [J]. 生态学报, 2019, 39(2): 672-683.

[41] 韦钧培, 杨云川, 谢鑫昌, 等. 基于服务簇的南宁市生态系统服务权衡与协同关系研究 [J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(1): 21-31.

[42] 张海洋, 杨琰瑛, 刘凯, 等. 基于生态系统服务的流域分区规划与管理: 以于桥水库流域为例 [J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(5): 1028-1039.

[43] 韩磊, 杨梅丽, 刘钊, 等. 黄土高原典型退耕区生态系统服务权衡与协同关系研究: 以延安市为例 [J]. 生态学报, 2022, 42(20): 8115-8125.

[44] Yang Y, Yuan X F, An J J, et al. Drivers of ecosystem services and their trade-offs and synergies in different land use policy zones of Shaanxi Province, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 452: 142077.

[45] 刘志春, 曹文侠, 王正文, 等. 2005—2020 年甘肃省甘南州水源涵养功能时空变化及其驱动因素 [J]. 水土保持通报, 2024, 44(3): 231-240.

[46] 刘振坤, 刘峰, 郑光辉, 等. 基于 RUSLE 模型的青藏高原土壤保持功能定量评价 [J]. 土壤, 2024, 56(1): 173-181.

[47] 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.

[48] 刘小波, 王玉宽, 刘勤, 等. 基于城市化梯度的中国西南地区生态系统服务权衡与协同 [J]. 生态学报, 2023, 43(22): 9416-9429.

责任编辑 包颖