

引用格式: 黄群英, 吴诗茵, 韦振锋, 温雪. 广西边境山区生态服务价值与农户生计耦合分析及生态补偿研究[J]. 山地学报, 2025, 43(1): 72-86.

HUANG Qunying, WU Shiyin, WEI Zhenfeng, WEN Xue. Analysis on coupling between ecological service value and farmers' livelihood in mountainous border areas of Guangxi, China and associated ecological compensation [J]. Mountain Research, 2025, 43(1): 72-86.

广西边境山区生态服务价值与农户生计耦合分析及生态补偿研究

黄群英¹, 吴诗茵¹, 韦振锋^{1, 2*}, 温雪¹

(1. 广西财经学院 经济与贸易学院, 南宁 530000; 2. 广西金融与经济研究院, 南宁 530000)

摘要: 边境山区生态-经济-社会系统呈现强关联性、动态敏感性和跨境传导性, 生态屏障功能衰退与生计空间重构的冲突已成为制约区域可持续发展的关键瓶颈。针对现有研究在跨学科整合与空间关联分析方面的不足, 本研究以广西边境地区为例, 采用生态当量因子法、生态耦合模型和生态补偿的方法, 分析 2004—2021 年生态系统服务价值演变规律, 探生计-生态耦合机理及补偿政策实施效应。结果表明: (1) 广西边境山区生态系统服务价值呈上升趋势, 从 2004 年的 447.10 亿元提高至 2021 年的 521.56 亿元, 其中林地贡献率达 52.64%, 反映出森林作为“生态服务综合载体”的主导地位。(2) 区域生计-生态耦合系统多为低度和中度耦合, 呈现“低度(37.5%)—中度(62.5%)”的梯度协调演进特征, 协调度年均提升 29.28%, 但空间差异明显。口岸城市(东兴市)因跨境贸易驱动引发生计策略转型, 导致生态服务供需结构性失衡, 呈现中度失调, 农户生计与生态环境协同不足。(3) 生态补偿总量呈“385.63 亿元—202.60 亿元”的阶梯递减趋势, 那坡县-宁明县处于生态补偿优先区, 其他县份相对较低, 生态补偿政策的配置差异是补偿效率衰减的关键因素。本研究可为广西边境地区的生态建设及生计振兴政策的制定和实施提供科学依据, 为促进边境地区人地协同可持续发展分区管控提供决策参考。

关键词: 生态系统服务价值; 农户生计; 生态补偿; 广西边境地区

中图分类号: F205

文献标志码: A

山区农户作为生态资源的关键利用主体, 其生计系统与生态系统服务(Ecosystem services, ES)呈现出复杂的双向反馈机制^[1-3], 其生产决策既受生态系统服务供给能力的制约, 又通过土地利用方式改变持续塑造着生态系统的结构与功能。这种“人-地”系统的动态耦合关系在生态敏感型边境地区尤为显著, 如何破解生态屏障功能退化与生计空间重构之间的发展悖论, 已成为实现区域可持续发展的

重要科学命题。

生态系统服务价值(Ecosystem service values, ESV)评估是一种量化生态修复成效的技术路径。ESV 空间异质性解析不仅可为差异化生态补偿提供地理空间决策支持^[4], 还可作为衡量农户生计可持续性水平的一个重要间接指标^[5]。

国内外学者已针对生态系统服务价值、农户生计及生态补偿开展了广泛研究。在生态系统服务价

收稿日期(Received date): 2024-08-21; 改回日期(Accepted date): 2025-02-03

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(72364001, 72363001); 广西财经学院经济与贸易学院学科项目(2024XKA03) [National Natural Science Foundation Project (72364001, 72363001); Academic Projects of School of Economics and Trade, Guangxi University of Finance and Economics (2024XKA03)]

作者简介(Biography): 黄群英(1983-), 女, 湖南南县人, 博士研究生, 主要研究方向: 生态环境评价。[HUANG Qunying (1983-), female, born in Nanxian, Hunan Province, Ph.D. candidate, research on ecological and environmental assessment] E-mail: 0314300133@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): 韦振锋(1983-), 男, 广西东兰人, 博士, 副教授, 主要研究方向: 国土空间规划与生态安全。[WEI Zhenfeng (1983-), male, born in Donglan, Guangxi Province, Ph.D., associate professor, research on territorial spatial planning and ecological security] E-mail: weizhenfeng112@163.com

值评估方面,通常基于当地土地利用情况^[6-9],并综合考虑各因素对生态环境的影响^[10-11],主要采用价值量评估法^[12]和物质量评估法^[13]这两种方法进行评估。关于农户生计研究,研究范式已从单纯的经济收入分析转向更为综合的可持续生计框架(Sustainable livelihoods framework, SLF)应用,关注生计资本测度^[14]、生计策略^[15]选择,以及生计稳定性与脆弱性评估^[16]。

边境山区作为特殊地理单元,具有地缘政治敏感、生态屏障脆弱、经济发展滞后、民族文化多样等特征,其生态-经济-社会系统呈现强关联性、动态敏感性和跨境传导性,生态屏障功能退化与生计空间重构之间的矛盾日益突出。稳定农户生计,实现边境农户生计转型已成为维系边境生态安全与区域社会稳定的关键^[17]。然而,现有研究多局限于单一学科视角,缺乏多学科的综合分析农户生计与经济、生态系统之间的相互作用。

本文选取广西边境地区作为研究案例,采用当量因子法计算该地区的生态系统服务总价值;构建生态系统服务价值与农户生计的子系统,并借助耦

合模型揭示二者之间的内在联系;基于生态系统服务价值和 GDP 计算生态补偿优先级、补偿需求强度系数以及补偿总量,探索生态与生计之间的平衡点。本文致力于促进生态系统服务价值、农户生计耦合分析及生态补偿的多学科融合,为广西边境地区的生态建设、生计振兴政策的制定和实施提供科学依据和决策参考。

1 研究区概况

广西边境地区地处中国南部边疆,与越南接壤,经纬度范围为 105°50' ~ 108°22'E、20°46' ~ 23°25'N,主要包括那坡县、靖西市、大新县、龙州县、宁明县、防城区、东兴市、凭祥市(图 1)。该地区属亚热带季风气候,年均温为 22℃,降水量达 2163 mm。受喀斯特地貌影响,区域石漠化程度较高,水土流失严重,生态脆弱,地势西北高、东南低。

广西边境地区是中国对东盟开放合作的前沿阵地,承担着国际贸易、文化交流和国防安全的重要职能。作为国家级重点开发开放试验区,该区域是国

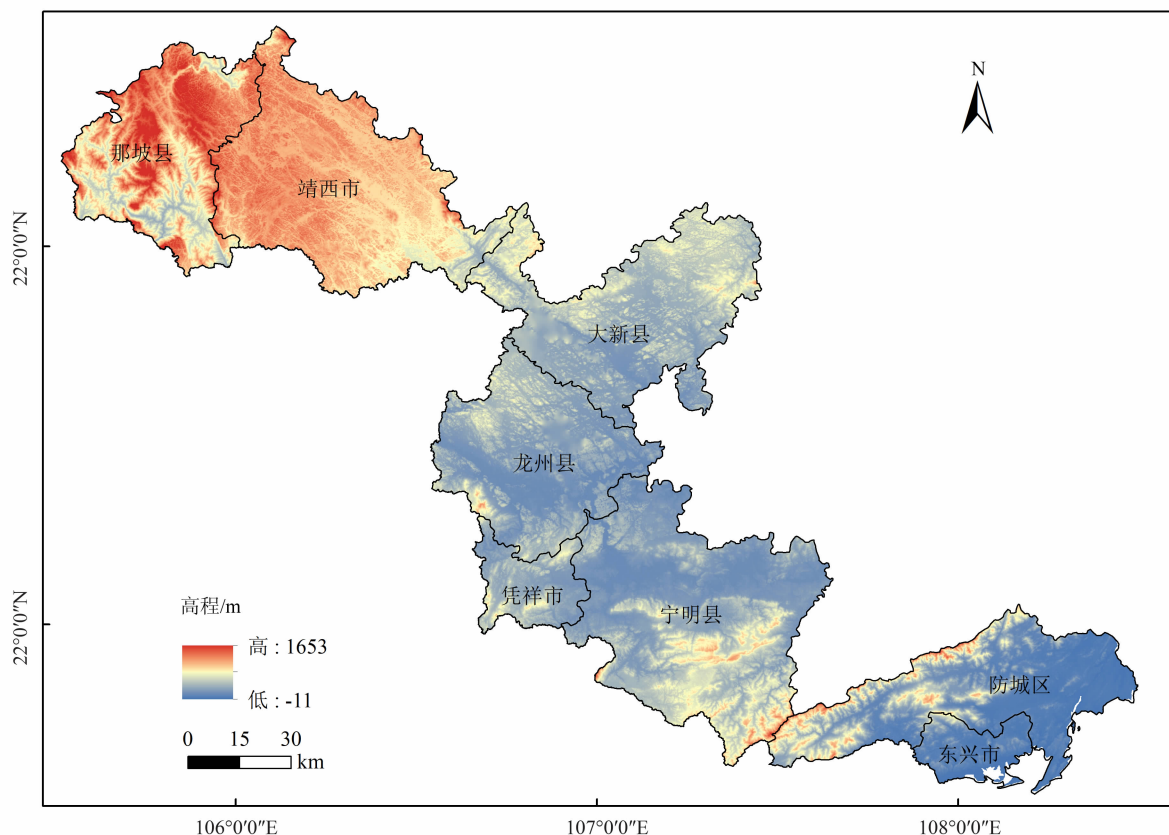


图1 广西边境地区区位图

Fig. 1 Location map of the Guangxi border areas

际陆海贸易新通道的关键枢纽。2020 年该地区常住人口达 227 万,少数民族占比超 80%,地区生产总值 731 亿元,呈现出“边境口岸城市化加速”与“传统农区空心化加剧”并存的特殊发展格局。

该区域作为国家生态安全屏障的南疆节点,是跨境生物多样性保护的关键区域,更是多民族共生发展的特殊社会单元。在“兴边富民”行动推进过程中,边境口岸经济极化效应与生态脆弱区民生保障需求之间的矛盾日益凸显,土地资源开发利用陷入“生态红线约束-产业发展诉求-边疆稳定需求”的三重博弈困境。

2 数据来源与处理

2.1 技术路线

本研究基于研究区特征,收集 2004—2021 年的相关数据并进行标准化处理,通过生态服务价值、生态补偿、农户生计耦合等模型估算,从时空维度探究边境地区生态系统服务价值-农户生计耦合-生态补偿演变特征,并运用耦合模型等方法分析区域人地关系及补偿优先级(图 2)。

2.2 数据处理

基于 ArcGIS 平台,本研究对土地利用数据进行重分类,将其划分为耕地、林地、草地、水域、建设用

地和未利用地六大类型。结合广西粮食产量及价格相关数据,计算生态服务价值、农户生计耦合协调度及生态补偿优先等级,并利用空间可视化技术分析区域生态与生计的时空关联特征。

2.3 数据来源

本研究依据已有研究成果^[4,9,18],结合研究区实际情况及数据可获取性,根据生态服务价值、生态补偿、农户生计等估算所涉及的评价指标来收集相对应的数据。数据来源如表 1 所示。

3 研究方法

本研究采用谢高地当量因子法^[19]测算生态系统服务价值,并结合研究区农业生产特征,选取稻谷、玉米、大豆作为主要经济产物进行核算^[18]。

参考相关研究^[20],并结合广西边境地区农户生计特点,本研究从社会资本和人力资本等多角度构建了一套综合评价指标体系,用于评估农户生计及生态系统服务的关系。同时,为量化分析二者协调程度,将协调度分为十级。该指标体系充分考虑了生计资本和外部经济环境的多重影响,能够有效反映研究区域的实际情况。

生态补偿主要针对具有公共属性的生态服务,其中可通过市场交易实现利益平衡的人工投入部分

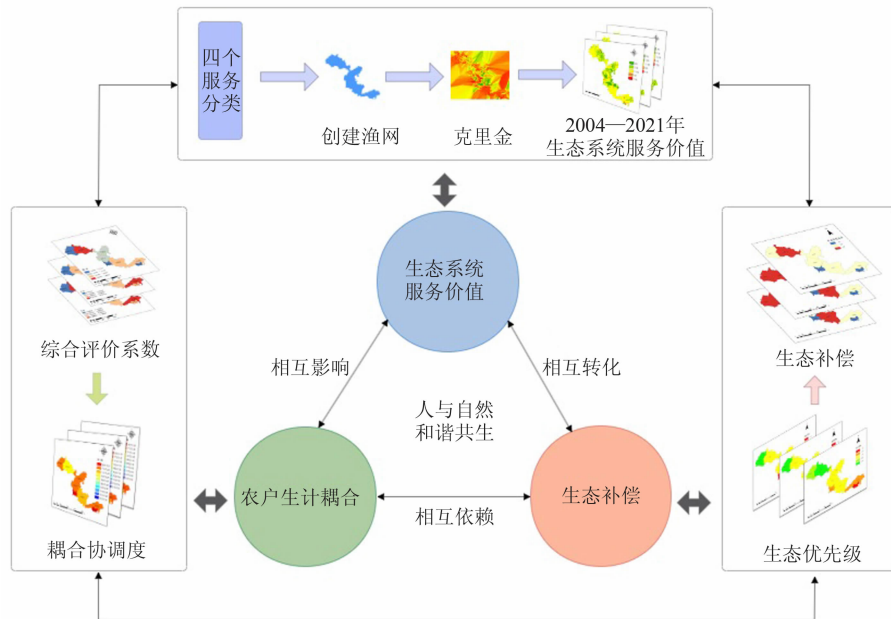


图 2 技术路线

Fig. 2 Technical roadmap

表 1 数据来源
Tab. 1 Data sources

数据名称	数据类型	涉及指标	数据来源
土地利用数据	栅格数据	土地利用类型、土地利用强度、土地利用变化	中国科学院资源环境科学数据中心
行政边界数据	矢量数据	研究区市(县)行政边界	https://www.resdc.cn/DOL/
经济和人口数据	属性数据	地区生产总值、人均地区生产总值、年末总人口、乡村就业人员、金融机构贷款金额、城乡居民储蓄余额、农村常住居民人均可支配收入、普通中学人数、小学人数	国家统计局 https://www.stats.gov.cn/
农产品数据	属性数据	粮食产量、粮食价格、农作物播种面积、农作物单位面积产量等数据	国家统计局 https://www.stats.gov.cn/

以及具有外溢性特征(如全球受益)的服务均不计入补偿范围。基于此,本研究构建生态补偿优先级指标,采用生态系统服务价值和 GDP 作为核心指标,评估广西边境生态补偿的优先次序,对影响较大的区域优先实施补偿支付,以缓解经济发展与生态保护之间的矛盾^[21]。

3.1 生态系统服务价值测算

本研究基于数据可获得性、研究区实际情况及测算方法的适用性,采用谢高地等学者提出的当量因子法^[22]进行生态系统服务价值测算。

3.1.1 生态系统服务价值系数估算

根据研究区内粮食产量、单位面积价格及播种面积,估算研究区内单位农田粮食的经济价值^[23]。计算公式如下:

$$E_a = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{m_i p_i q_i}{M} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

式中, E_a 为单位面积农田粮食作物所产生的经济价值(元/hm²); n_1 为粮食作物的种类($n = 3$); m_i 、 p_i 、 q_i 分别为第 i 种粮食作物的平均播种面积(hm²)、平均价格(元/t)、平均单位面积产量(t/hm²); M 为 n_1 种粮食作物的平均总面积。

3.1.2 生态系统服务价值估算

通过修正生态系统服务价值当量因子表(表 2)估算广西边境地区生态系统服务价值系数表,并利用土地利用数据计算区域生态系统服务价值^[22]。计算公式如下:

$$E_{SV,t} = \sum_{k=1}^{n_2} (A_{kt} \times C_k) \quad (2)$$

式中, $E_{SV,t}$ 为 t 时期的生态系统服务总值(元); n_2 为用地类型数量; A_{kt} 表示为在 t 时期的第 k 种地类面积; C_k 为第 k 种地类的生态服务价值系数之和。

3.2 农户生计综合评价指数

本研究参考相关研究成果^[24],以金融资本、自然资本、人力资本、物质资本、社会资本作为农户生计评价要素,构建广西边境农户生计与生态系统服务的综合评价指标体系,各指标皆为正向指标(如表 3 所示)。

计算各指标比重:

$$Y_{ij} = \frac{X'_{ij}}{\sum_{i=1}^m X'_{ij}} \quad (3)$$

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m (Y_{ij} \times \ln Y_{ij}) \quad (4)$$

$$k = \frac{1}{\ln(h \times m)} \quad (5)$$

$$D_j = 1 - e_j \quad (6)$$

$$W = \frac{D_j}{\sum_{j=1}^{n_3} D_j} \quad (7)$$

式中, Y_{ij} 为指标比重; X'_{ij} 为已进行无量纲处理后的数据; m 为评价年数(本文 $m = 3$); e_j 为指标信息熵,当 $k = \frac{1}{\ln(h \times m)}$ 时,则 $0 \leq e_j \leq 1$,且当 $Y_{ij} = 0$ 时,令 $Y_{ij} \times \ln Y_{ij} = 0$; h 为地区数量; D_j 为信息熵冗余度; W 为各指标权重; n_3 为指标数量。

根据各指标权重后可计算农户生计综合指数,计算公式如下:

$$T_{ik} = \sum_{j=1}^{n_3} (e_j \times Y_{ij}) \quad (8)$$

式中, T_{ik} 为综合指数。

3.3 农户生计耦合协调度计算

本研究通过计算生态系统服务综合指数与农户生计综合评价指数,构建耦合协调度模型,公式如下^[25]:

表 2 2004—2021 年广西边境地区生态系统服务价值当量因子表
Tab.2 Equivalent factors of ecosystem service value in Guangxi border areas from 2004 to 2021

生态系统分类		耕地			林地			草地			水域			未利用地		
		2004 年	2012 年	2021 年	2004 年	2012 年	2021 年	2004 年	2012 年	2021 年	2004 年	2012 年	2021 年	2004 年	2012 年	2021 年
供给服务	食物生产	1244	2275	2589	284	520	592	263	480	547	737	1349	1535	11	21	23
	原料生产	276	504	574	653	1194	1359	386	707	804	411	751	855	34	62	70
	水资源供给	-1469	-2687	-3058	338	618	703	214	391	445	6123	11200	12747	23	41	47
调节服务	气体调节	1002	1832	2085	2147	3927	4470	1358	2484	2827	1503	2749	3128	124	226	258
	气候调节	523	957	1090	6424	11751	13374	3591	6568	7475	3315	6063	6901	113	206	234
	净化环境	152	278	316	1882	3443	3919	1186	2169	2468	5149	9419	10720	349	638	726
	水文调节	1683	3078	3503	4204	7690	8752	2630	4811	5475	71174	130191	148169	236	432	492
支持服务	土壤保持	585	1071	1218	2614	4782	5442	1655	3027	3444	1823	3335	3796	146	268	305
	维持养分	174	319	363	200	365	416	128	233	266	141	257	293	11	21	23
	生物多样	191	350	398	2381	4354	4956	1504	2752	3132	5864	10727	12208	135	247	281
文化服务	美学景观	84	154	176	1044	1910	2173	664	1215	1382	3726	6815	7756	56	103	117

表 3 农户生计和生态系统服务指标体系
Tab.3 Indicators of livelihoods and ecosystem services for farmers

目标层	准则层	指标内容	目标层	准则层	指标内容
生 计 资 本	金融资本	农村常住居民人均可支配收入(元)	生 态 系 统 服 务	供给服务	原料生产(元)
		城乡居民储蓄余额(万元)			食物生产(元)
		金融机构贷款金额(万元)			水资源供给(元)
		人均地区生产总值(元/人)		调节服务	气候调节(元)
	人力资本	乡村就业人员(万人)			气体调节(元)
		小学人数(人)			水文调节(元)
		普通中学人数(人)			净化环境(元)
	物质资本	医院卫生院床位数(床)		支持服务	土壤保持(元)
	社会资本	城镇化率(%)			生物多样(元)
	自然资本	人均水域面积(m ² /人)		文化服务	维持养分(元)
		人均耕地面积(hm ² /万人)			美学景观(元)

$$C = n_4 \times \left\{ \frac{U_1 U_2}{(U_1 + U_2)^2} \right\}^{\frac{1}{n_4}} \tag{9}$$

$$D = \sqrt{CT} \tag{10}$$

$$T = \alpha U_1 + \beta U_2 \tag{11}$$

式中, C 为耦合度, $0 \leq C \leq 1$; n_4 为子系统个数; U_1 为生态系统服务价值综合评价指数; U_2 为农户生计综合评价指数; D 为耦合协调度, $0 \leq D \leq 1$, D 越大, 协同度越高; T 为综合发展系数; α 和 β 为待定系数, 两个子系统在计算中同等重要, $\alpha = \beta = 0.5$ 。参考

已有研究^[26], 将协调度划分为十个等级(表 4)。

表 4 农户生计耦合协调度等级
Tab.4 Level of coupling coordination of livelihoods among farmers

耦合协调度	等级	耦合协调度	等级
(0, 0.15]	极度失调	(0.55, 0.65]	勉强失调
(0.15, 0.25]	严重失调	(0.65, 0.75]	初级协调
(0.25, 0.35]	中度失调	(0.75, 0.85]	中级协调
(0.35, 0.45]	轻度失调	(0.85, 0.95]	良好协调
(0.45, 0.55]	濒临失调	(0.95, 1]	优质协调

4 结果分析

4.1 生态系统服务价值时空演变

2014—2021 年,广西边境地区生态系统服务价值整体呈上升趋势,2004 年、2012 年及 2021 年生态系统服务价值分别为 447.10 亿元、449.83 亿元和 521.56 亿元(图 3)。各县空间分布存在差异,其中靖西市持续下降,反映了高强度开发活动对生态系统的负面影响,其余市(县)先上升后下降。2004—2012 年期间,开放强度较低,生态环境得到改善;而 2012—2021 年期间,城镇化进程加速,生态改善速度明显放缓。

2004—2021 年,各地类生态系统服务价值统计情况如表 5 所示,其高低排序依次为林地、耕地、水域、草地、未利用地和建设用地,其中林地的生态服务价值具有不可替代性,贡献率达 52.64%。在此

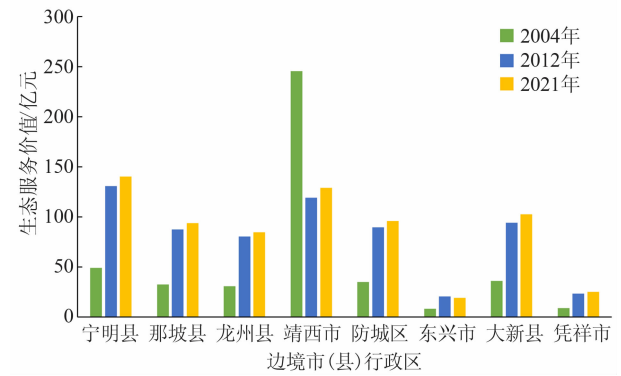


图 3 广西边境地区各市(县)生态系统服务价值
Fig. 3 Ecosystem service value of each city
(county) in Guangxi border areas

期间,生态系统服务价值总体呈现出“三增两减一不变”的特征,即林地、草地和水域的价值不断增加,耕地和未利用地的价值有所减少,而建设用地的价值则保持稳定(图 4)。这一变化是经济发展和生

表 5 各地类生态系统服务价值及变化
Tab. 5 Changes in the value of ecosystem services in various regions (单位:亿元)

土地类型	生态系统服务价值			生态系统服务价值增加量		
	2004 年	2012 年	2021 年	2004—2012 年	2012—2021 年	2004—2021 年
耕地	27.34	27.77	14.57	0.43	-13.20	-12.77
林地	589.65	593.15	644.07	3.59	50.91	54.42
草地	0.48	0.39	33.36	-0.10	32.98	32.89
水域	24.49	24.59	53.38	0.10	28.79	28.89
未利用地	0.06	0.05	0.02	-0.01	-0.03	-0.04

注:增加量中的“-”表示下降。

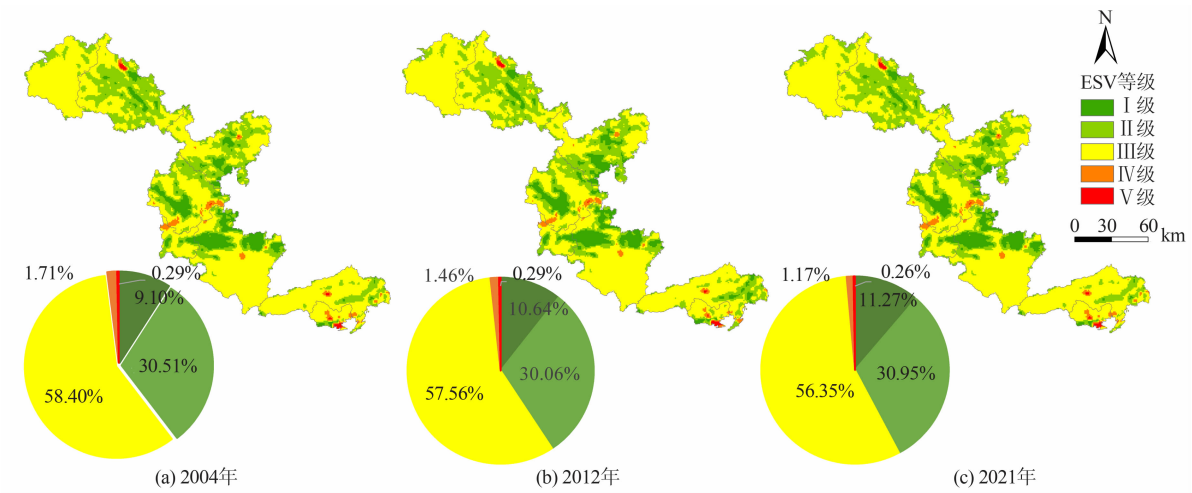


图 4 2004—2021 年研究区生态系统服务价值空间特征

Fig. 4 Spatial characteristics of ecosystem service values (ESV) in the research area during 2004 - 2021

态保护修复双重作用的结果^[27]。

研究区生态服务价值的时空演化差异显著,不同地区的发展强度对生态环境影响各异(图5)。东兴市随着旅游业兴起,环境压力增大、生态受损,其生态系统服务价值高等级区范围缩减,从2004年V级降至2021年的III级。那坡县生态系统服务价值变化显著,存在边缘降级现象。该县人口稀少且城镇化率低,减少了人为干扰,从而保留了较高的生态价值^[28],但也限制了当地经济的发展和生态服务价值的进一步提升^[29]。此外,教育体系的不完善进一步影响生态系统服务价值提升。本文研究表明,研究区生态系统服务价值总量增加,但空间分布存在差异,如那坡县为III级,靖西市为II级。局部高等级范围缩小,如耕地和未利用地生态服务价

值下降^[30],经济建设虽提高了经济价值,但也因土地资源浪费对生态系统造成冲击^[31-32],需采取有效措施优化土地利用结构。

研究期间,地区生态系统服务价值等级发生显著转移,主要表现为I级和III级向IV级转移。这表明地区生态系统服务价值波动较为明显,主要原因是地区发展(如城镇化进程或农户生计方式转变)对周边生态环境造成了一定的破坏和扰动。同时,低等级向高等级的转变进一步表明,人们在生产生活中越来越重视生态环境保护,生态意识的提升促进了生态系统服务价值的增强与流动性。

4.2 生态服务价值与农户生计耦合分析

2004—2021年,农户生计综合评价系数呈显著增长趋势(图6),从2004年的 $89.64 \times 10^{-4} \sim 596.20 \times$

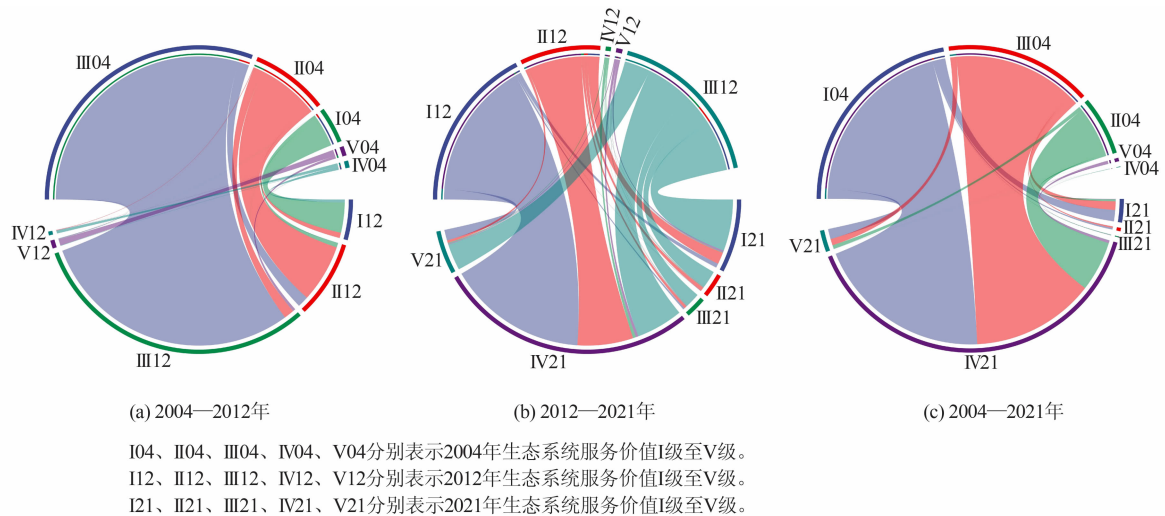


图5 2004—2021年地区生态系统服务价值转移

Fig. 5 Spatiotemporal transition of regional ecosystem service values (ESV) during 2004–2021

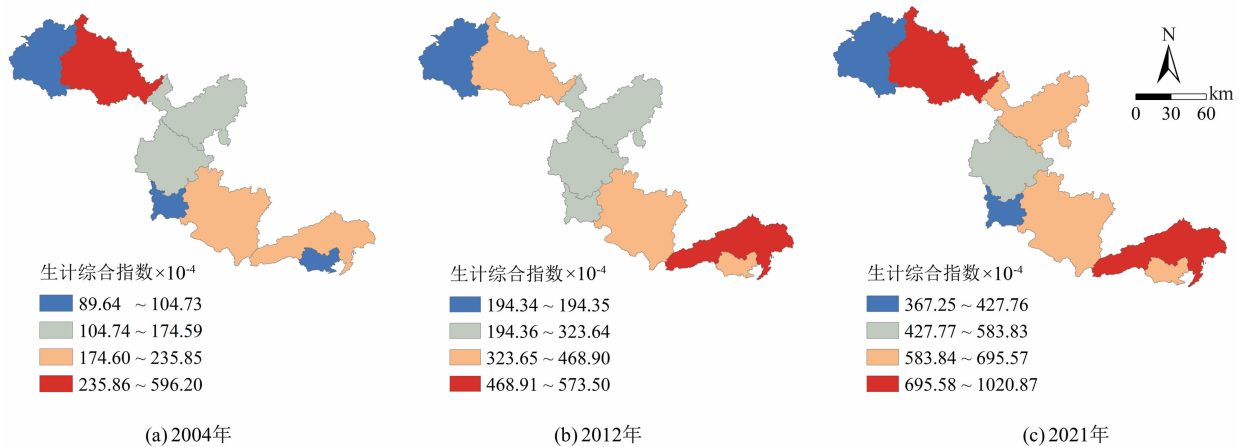


图6 农户生计综合发展系数

Fig. 6 Comprehensive development coefficient of livelihoods for farmers

10^{-4} 上升至 2021 年的 $367.25 \times 10^{-4} \sim 1020.87 \times 10^{-4}$ 。其主要原因是地区农户逐渐从单一依赖自然环境的生计方式转向多元化和多样化生产^[33],这一转变提升了农户收入,推动了生计高质量发展。

参考已有研究^[20],将耦合度划分为四个等级:0.0~0.4 为低度耦合,0.4~0.8 为中度耦合,0.8~0.9 为高度耦合,0.9~1.0 为极度耦合。本研究区生态服务价值与农户生计耦合关系如图 7 所示,主要表现为低度耦合和中度耦合,由低度(37.5%)向中度(62.5%)转变。这与边境地区农户生产生活在生态环境资源的高度依赖密切相关,地区农户生计综合发展的提升主要依赖于多元化和多样化的生计方式转变,这一过程加剧了对生态环境资源的获取,导致生态环境破坏,呈现出人地关系的低度耦合。因此,边境地区生态安全屏障建设与农户发展同等重要,对于过度依赖自然资源的地区应实施生态补偿措施,以有效提升地区人地耦合协调度。

2004 年,靖西市生态服务价值与农户生计耦合关系为中度耦合,其余地区为低度耦合。究其原因,靖西市“田七”产业不仅为当地居民提供了稳定的

生计来源,还推动了区域经济的发展。2012 年,随着旅游业的兴起,虽然经济得到了进一步发展,但生态环境却遭受了一定程度的破坏,对农户生计产生了负面影响,生态系统与经济系统的耦合协调度有所下降。2021 年,广西边境地区在经济高质量发展和生态保护方面取得显著成效。在“边发展边保护”政策推动下,人民生活水平显著提高^[26],多地经济与生态达到中度耦合,实现了良性协调发展。通过耦合协调度分析发现,地区间相互影响显著,大部分地区呈低度耦合,表明生态与农户生计之间存在失调,这主要源于农户对自然资源的高度依赖,其生产生活过度依赖生态资源,导致人地关系失调严重。因此,针对边境地区,通过生态补偿可有效缓解这一问题,促进区域经济与生态系统的良性循环。

如图 8 所示,失调程度低的地区实现了经济生态双赢,失调度高的地区则面临资本积累慢、生计单一的问题。2004—2012 年,广西边境地区耦合协调度以失调为主,但后期逐渐改善。至 2021 年,大部分地区转为轻度失调,整体协调度持续上升,发展潜力较大,这得益于边境安全、生态环境改善、旅游业发展及乡村振兴战略的推进。

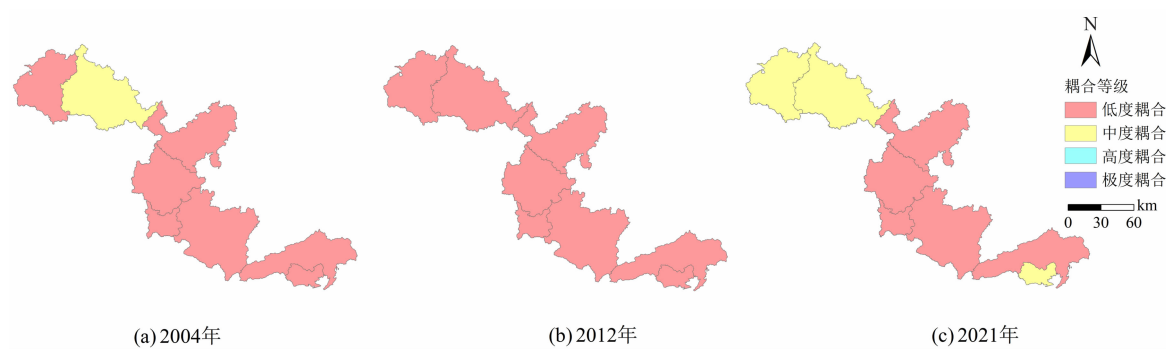


图 7 广西边境地区农户生计耦合

Fig. 7 Coupled livelihoods of farmers in Guangxi border areas

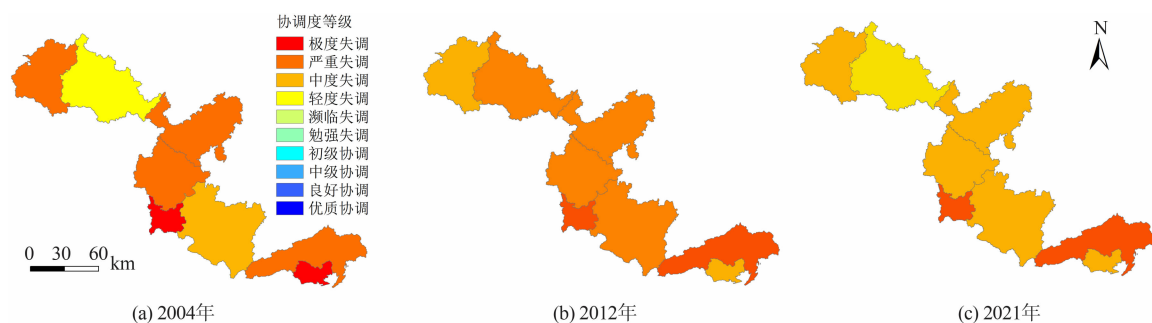


图 8 广西边境地区农户耦合协调度

Fig. 8 Coupled cooperative scheduling of farmers in Guangxi border areas

4.3 生态优先级与补偿

4.3.1 生态优先级分析

生态优先级分析结果(表 6、图 9)显示,县域间生态服务价值与 GDP 差异显著,导致生态优先级存在明显差异。广西边境地区生态补偿分为五级,等级越高的地区补偿需求越迫切。那坡县和宁明县生态价值较高,但由于经济发展水平较低,需优先补偿;其他地区 GDP 较高,补偿需求相对较低。随时间推移,补偿优先级指数整体呈现下降趋势,其中靖西市变化最为显著,从 2004 年的 15.64 下降至 2021 年的 0.61。凭祥市的补偿需求有所降低,而那坡县和宁明县的需求则有所上升。大新县和龙州县始终保持在三级,未发生明显变化。

表 6 广西边境地区生态优先级
Tab. 6 Ecological priority in Guangxi border areas

县(市)名称	优先级指数		
	2004 年	2012 年	2021 年
宁明县	3.16	1.66	0.88
那坡县	7.17	5.63	1.42
龙州县	2.27	1.27	0.63
靖西市	15.64	1.16	0.61
防城区	1.64	1.00	0.57
东兴市	0.68	0.33	0.24
大新县	2.27	1.15	0.64
凭祥市	1.20	0.65	0.22

4.3.2 生态补偿总量分析

2004—2021 年,研究区各县生态补偿总量如

表 7 所示,其中那坡县由于经济水平低且生态受损严重,补偿金额增加至 40.87 亿元。百色市由于采矿污染,生态价值下降。宁明县因林业发展缓慢及环保措施不足,生态损害加剧,补偿等级上升。生态补偿的提升有助于提高生态系统服务价值^[34],注重农户生计耦合与补偿,能够促进生态保护与生计发展的协调,减轻生态压力,实现生态与生计的可持续发展及高质量发展。

本文采用自然断点法将生态补偿总量划分为三级,补偿等级越高的地区,补偿金额越大。靖西市的补偿金额最大,位于第三级;龙州县、大新县、防城区位于第二级;凭祥市和东兴市位于第一级(图 10)。目前,生态破坏的影响范围已扩大至周边地区,补偿范围随之扩展。由于政府主导的补偿措施以资金补偿为主,补偿压力较大,生态系统服务价值下降、经济发展放缓、农户生计增长缓慢,因此需提出相应对策以缓解这一困境。

4.4 生态系统服务价值与农户耦合及生态补偿分析

从整体来看,农户生计水平的提高、生态系统服务价值的增加与生态补偿的减少之间存在密切关联,这进一步表明农户作为生态系统的核心组成部分,其生产活动与生活方式和生态系统服务价值密切相关。生态补偿机制在维护生态平衡中具有不可替代的作用,尤其是农户与生态系统的紧密耦合状态是生态补偿机制有效实施的重要基础。生态补偿机制不仅激励农户积极参与生态保护与恢复工作,还通过合理的补偿方式弥补农户因生态保护可能遭受的经济损失,促进生态环境的持续健康发展,从而强化农户耦合并提升生态系统服务价值。

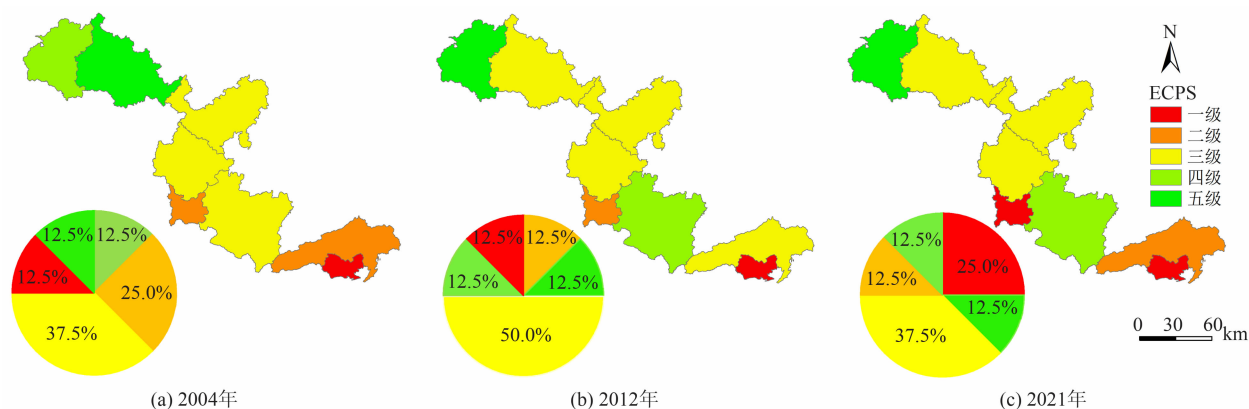


图 9 2004—2021 年广西边境地区生态优先级

Fig. 9 Ecological priority of Guangxi border areas from 2004 to 2021

表 7 2004—2021 年广西边境地区生态补偿总量

Tab. 7 Total ecological compensation in Guangxi border areas from 2004 to 2021 (单位:亿元)

县(市)名称	2004 年	2012 年	2021 年	增加量		
				2004—2012 年	2012—2021 年	2004—2021 年
宁明县	39.63	85.64	47.51	46.01	-38.13	7.88
那坡县	29.81	77.85	40.87	48.04	-36.98	11.06
龙州县	22.71	46.18	23.18	23.47	-23.00	0.47
靖西市	235.79	65.05	33.43	-170.74	-31.62	-202.36
防城区	22.84	44.79	24.83	21.95	-19.96	1.99
东兴市	3.15	4.15	2.86	1.00	-1.29	-0.29
大新县	26.70	51.23	27.43	24.53	-23.80	0.73
凭祥市	5.01	8.58	2.48	3.57	-6.10	-2.53

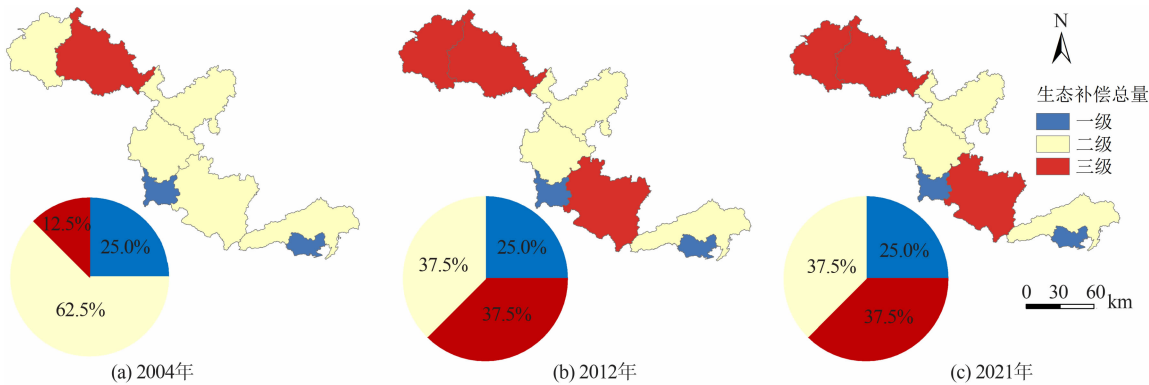


图 10 生态补偿总量等级图

Fig. 10 The total amount level of ecological compensation

5 讨论

本研究通过融合生态系统服务价值评估与人地系统耦合理论框架,探究边境地区经济发展与生态环境的动态演变机制,研究结果不仅为广西边境地区发展提供直接决策支持,其方法论创新对全球边境地区的生态-生计协同治理也具有重要参考价值。研究采用当量因子法和生计耦合模型,综合生态经济指标,引入生态系统服务价值子系统,直观揭示了生态经济与农户生计的相辅相成关系^[35]。广西边境地区地处山区,生态环境脆弱,经济发展相对滞后,人口外流严重,多重问题叠加,通过生态补偿研究,有助于加强生态建设,提升农户生计水平,促进边境地区生态-生计耦合协同发展,为差异化管理与政策制定提供科学依据。生态与经济的协调发展需注重自然资源保护,发展多元化农户生计,统筹生态

系统服务价值布局^[36],强化土地利用与生态安全管控。喀斯特地貌的生态保护面临巨大挑战^[37],因此,健全补偿机制^[38]、贯彻生态保护政策^[39]成为广泛共识。通过新型横向生态补偿^[37]和全社会参与的纵向补偿,可以有效减轻财政压力,促进经济发展,吸引人才返乡,实现经济与生态的协同发展^[41]。

本研究结论验证了生态-生计协同优化的可行性,为边境地区分区管控提供了科学依据。通过生态系统服务价值与农户生计耦合协调度的空间分区识别,验证了“生态补偿政策需差异化管理”的前提假设。在生态价值较高区域,应优化现有生态资源,实现经济、生态与社会效益的统一;在生态价值较低区域,应强化生态保护并推进生态补偿^[39],例如宁明县可发展林下经济与绿色旅游。广西边境地区资源丰富但不可再生,因此需严格管控,优化资源的合理开发与利用^[43]。

本研究成果修正了生态补偿理论的空间适用边

界,揭示了跨境特殊性对传统范式的挑战。研究发现,在高生态风险区(如石漠化率 > 25% 的那坡县),传统的价值量评估法高估了补偿需求,且忽视了跨境民族文化对资源利用的约束(如壮族“那文化”对梯田保护的隐性调控)。

本研究基于生态-生计耦合演化规律,提出了差异化的生态补偿策略,有助于推动“边境人地系统弹性治理”政策创新路径的形成。在生态高敏感-文化异质区(如大新县明仕田园),可推行“社区主导型弹性补偿”;在跨境灾害链影响区,建议建立“地缘风险对冲基金”,通过数字货币结算实现补偿额度的动态调整。

本研究揭示了边境地区生态-生计之间的演变机制,但仍存在以下不足。(1)生态补偿研究仅基于生态系统服务价值,未考虑其他影响因素及不同土地类型,且未开展农户生计实地调研,导致对策的实用性与适用性不够全面。(2)时序数据的局限性影响了长期效应评估,难以全面捕捉供给/支持类生态系统服务对生计的滞后性影响,导致影响路径的历时性规律阐释不足。未来需拓展至更大时空尺度进行纵向追踪研究。(3)现有分析聚焦生态系统服务对生计资本的单向作用,尚未构建生计资本动态变化对生态服务的反馈模型,双向反馈机制研究的深度不足。后续研究应融合资源环境经济学、生态经济学等多学科方法,深入探究生态-生计之间的空间响应异质性、协同增效机制及可持续耦合路径,以形成“生态治理-经济发展-民生改善”的闭环优化体系,实现生态资产增值与居民福祉提升的良性互馈。

6 结论

(1)2004—2021 年,研究区生态系统服务价值呈现“三增两减一不变”的演变特征,变化幅度由大到小依次为林地、草地、水域、耕地及未利用地。2004 年研究区的生态系统服务总价值为 447.10 亿元,2021 年增至 521.56 亿元,整体呈上升趋势,但空间分布差异显著,具流动性、聚集性和转移性。边境地区以林地为主,但局部人类活动对生态环境的破坏依然存在,导致局部生态系统服务价值减弱,因此需实施差异化管理。

(2)2004—2021 年,研究区内农户生计与生态系统服务价值呈正相关关系,生计综合发展系数显

著上升,逐渐呈现聚集性发展特征。生态服务价值与农户生计耦合度呈先上升后放缓趋势,2004—2012 年地区发展处于起步阶段,人类活动对生态环境的影响较小;2012—2021 年地区快速发展导致耦合度下降,主要原因是城镇化水平较低,经济发展迅速但人力资本和社会资本发展滞后。这表明人类生计活动对生态环境的影响显著,未来应提倡可持续生计模式,有效促进边境地区农户生计与生态系统的协同发展。

(3)研究期生态补偿总量逐期下降,2004 年、2012 年及 2021 年分别为 385.63 亿元、383.47 亿元和 202.60 亿元,各年份生态补偿优先排名变化较小,但整体优先级随时间推移逐渐降低,其中那坡县和宁明县生态补偿需求较高,为优先补偿地区。边境地区通过差异化的生态补偿策略,有效防止了生态陷阱导致的返贫现象,同时促进了“生态治理-经济发展-民生改善”闭环优化体系的形成,推动了地区人地系统的弹性治理。

参考文献(References)

- [1] 米丹丹, 斯琴朝克图, 乌兰图雅, 等. 蒙东地区乡村聚落空间演变特征及其影响因素[J]. 山地学报, 2023, 41(6): 863 - 878. [MI Dandan, SIQIN Chaoketu, WULAN Tuya, et al. Spatial evolution and influencing factors of rural settlements in eastern Inner Mongolia, China [J]. Mountain Research, 2023, 41(6): 863 - 878] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000793
- [2] 王新菲. 森林恢复背景下三峡库区生态系统服务与农户生计的关联特征[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022: 1 - 88. [WANG Xinfai. Relationships between ecosystem services and farmers' livelihoods in the Three Gorges Reservoir area under forest restoration [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022: 1 - 88] DOI: 10.27158/d.cnki.ghznu.2022.000492
- [3] CINNER J E, MCCLANAHAN T R, GRAHAM N A J, et al. Vulnerability of coastal communities to key impacts of climate change on coral reef fisheries [J]. Global Environmental Change, 2012, 22(1): 12 - 20. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2011.09.018
- [4] 王茹, 张先平, 张晓玲, 等. 2000 - 2020 年山西省宁武县生态系统服务价值时空动态研究[J]. 西北林学院学报, 2024, 39(1): 264 - 272. [WANG Ru, ZHANG Xianping, ZHANG Xiaoling, et al. Spatiotemporal dynamics of ecosystem service value in Ningwu County, Shanxi Province from 2000 to 2020 [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2024, 39(1): 264 - 272] DOI: 10.3969/j.issn.1001-7461.2024.01.35
- [5] 叶文丽, 王银, 杨晴青, 等. 黄土高原农户生计脆弱性与生态退化的空间关系——以陕西省佳县为例[J]. 生态学报, 2024, 44(17): 7577 - 7588. [YE Wenli, WANG Yin, YANG

- Qingqing, et al. Spatial relationship between livelihoods vulnerability and habitat degradation on the Loess Plateau: A case study of Jiaxian County, Shaanxi Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, **44** (17): 7577 – 7588] DOI: 10.20103/j.stxb.202309192015
- [6] 程玉恒, 乔伟峰, 何天祺, 等. 南京市高淳区村域尺度土地利用功能变化及生态系统服务价值响应研究[J]. *地理科学*, 2024, **44**(2): 340 – 350. [CHENG Yuheng, QIAO Weifeng, HE Tianqi, et al. Response of ecosystem services value to land use function change at the village scale in Gaochun District, Nanjing [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2024, **44** (2): 340 – 350] DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.20220938
- [7] YANG Renfei, REN Fu, XU Wenxuan, et al. China's ecosystem service value in 1992 – 2018: Pattern and anthropogenic driving factors detection using Bayesian spatiotemporal hierarchy model [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, **302**: 114089. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.114089
- [8] 许译方, 周永杰, 何煜然, 等. 基于土地利用变化的粤港澳大湾区生态系统服务价值预测研究[J]. *生态科学*, 2020, **39** (1): 207 – 212. [XU Yifang, ZHOU Yongjie, HE Yuran, et al. Study on the prediction of ecological system service values based on the changes of land use in Guangdong-Hong Kong-Macau Greater Bay Area [J]. *Ecological Science*, 2020, **39** (1): 207 – 212] DOI: 10.14108/j.cnki.1008 – 8873.2020.01.026
- [9] 钱大文, 曹广民, 杜岩功, 等. 2000—2015 年祁连山南坡生态系统服务价值时空变化[J]. *生态学报*, 2020, **40**(4): 1392 – 1404. [QIAN Dawen, CAO Guangmin, DU Yangong, et al. Spatial-temporal dynamics of ecosystem service value in the southern slope of Qilian Mountain from 2000 to 2015 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40** (4): 1392 – 1404] DOI: 10.5846/stxb201811292598
- [10] SCHETKE S, LEE H, GRAF W, et al. Application of the ecosystem service concept for climate protection in Germany [J]. *Ecosystem Services*, 2018, **29**: 294 – 305] DOI: 10.1016/j.ecoser.2016.12.017
- [11] SELIVANOV E, HLA VACKOVA P. Methods for monetary valuation of ecosystem services: A scoping review [J]. *Journal of Forest Science*, 2021, **67**(11): 499 – 511. DOI: 10.17221/96/2021 – JFS
- [12] DE GROOT R, BRANDER L, VAN DER PLOEG S, et al. Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units [J]. *Ecosystem Services*, 2012, **1**(1): 50 – 61. DOI: 10.1016/j.ecoser.2012.07.005
- [13] 潘鹤思, 李英, 陈振环. 森林生态系统服务价值评估方法研究综述及展望[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, **32**(6): 1003 – 7578. [PAN Hensi, LI Ying, CHEN Zhenhuan. A review and perspectives on the methods for evaluation of forest ecosystem service values [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, **32**(6): 1003 – 7578] DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2018.175
- [14] 阿如娜, 高红贵, 金良. 生计资本对农牧户绿色生产行为的影响研究——基于内蒙古半农半牧区农牧户调查数据[J]. *中国农业资源与区划*, 2024: 2096 – 4188. [A Runa, GAO Honggui, JIN Liang. Effects of livelihood capital on green production behaviour of farmers and herdsmen: Based on the survey data of farmers and herdsmen in semi-agricultural and semi-pastoral areas of Inner Mongolia [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2024: 2096 – 4188]
- [15] KUANG Foyuan, JIN Jianjun, HE Rui, et al. Influence of livelihood capital on adaptation strategies: Evidence from rural households in Wushen Banner, China [J]. *Land Use Policy*, 2019, **89**: 104228. DOI: 10.1016/j.landusepol.2019.104228
- [16] DAS M, DAS A, MOMIN S, et al. Mapping the effect of climate change on community livelihood vulnerability in the riparian region of Gangatic Plain, India [J]. *Ecological Indicators*, 2020, **119**: 106815. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106815
- [17] 叶文丽, 王银, 吴孔森, 等. 黄土高原农户生计转型及其生态效应——以陕西省佳县为例[J]. *生态学报*, 2023, **43** (6): 2323 – 2335. [YE Wenli, WANG Yin, WU Kongsan, et al. Livelihood transformation of farmers' livelihood transition and ecological effects on Loess Plateau: A case study of Jiaxian County, Shaanxi Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43** (6): 2323 – 2335] DOI: 10.5846/stxb202203280766
- [18] 李树森. 滇西北地区生态系统服务价值的影响因素研究[D]. 昆明: 云南财经大学, 2024: 1 – 58. [LI Shumiao. Study on the factors influencing of the value of ecosystem services in northwest Yunnan [D]. Kunming: Yunnan University of Finance and Economics, 2024: 1 – 58] DOI: 10.27455/d.cnki.gycmc.2023.000046
- [19] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. *自然资源学报*, 2015, **30** (8): 1243 – 1254. [XIE Gaudi, ZHANG Caixia, ZHANG Leiming, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, **30** (8): 1243 – 1254] DOI: 10.11849/zrzyxb.2015.08.001
- [20] 马随随, 张华兵, 王清. 生态系统服务与农户生计的时空耦合关系研究——以里下河地区为例[J]. *中国农业资源与区划*, 2023, **44**(3): 79 – 88. [MA Suisui, ZHANG Huabing, WANG Qing. Study on spatio-temporal characteristics of the coupling relationship between ecosystem services and farmers' livelihood: A case study of Lixia River region [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023, **44**(3): 79 – 88] DOI: 10.7621/cjarrp.1005 – 9121.20230309
- [21] 王女杰, 刘建, 吴大千, 等. 基于生态系统服务价值的区域生态补偿——以山东省为例[J]. *生态学报*, 2010, **30** (23): 6646 – 6653. [WANG Nujie, LIU Jian, WU Daqian, et al. Regional eco-compensation based on ecosystem service assessment:

- A case study of Shandong Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(23): 6646 – 6653] DOI: 10.20103/j. stxb. 2010. 23. 038
- [22] 谢高地. 生态资产评价: 存量、质量与价值[J]. 环境保护, 2017, **45**(11): 18 – 22. [XIE Gaodi. Ecological asset evaluation: Stock, quality and value. *Environmental Protection*, 2017, **45**(11): 18 – 22] DOI: 10.14026/j. cnki. 0253 – 9705. 2017. 11. 003.
- [23] 危小建, 辛思怡, 张颖艺, 等. 不同格网尺度下生态系统服务价值空间分异及其影响因素差异——以大南昌都市圈为例[J]. 生态学报, 2023, **43**(18): 7585 – 7597. [WEI Xiaojian, XIN Siyi, ZHANG Caixiang, et al. Spatial difference of ecological services and its influencing factors under different scales: Taking the Nanchang Urban Agglomeration as an example. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(18): 7585 – 7597] DOI: 10.20103/j. stxb. 202203310811.
- [24] 王小兰, 余珂, 侯兰功. 岷江上游农户生计资本与生计稳定性耦合协调分析[J]. 西安理工大学学报, 2024, **40**(4): 562 – 573. [WANG Xiaolan, YU Ke, HOU Langong. Coupling and coordination analysis of livelihood capital and livelihood stability of farmers in the upper reaches of the Min River, China [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2024, **40**(4): 562 – 573] DOI: 10.19322/j. cnki. issn. 1006 – 4710. 2024. 04. 013
- [25] 郝峻峰. 云南省农户生计资本时空演变及耦合协调研究[J]. 安徽乡村振兴研究, 2023(6): 92 – 107. [HAO Junfeng. Study on spatial-temporal evolution and coupling coordination of livelihood capital of rural residents in Yunnan Province [J]. *Agricultural Revitalization Research in Anhui*, 2023(6): 92 – 107] DOI: 10.13454/j. issn. 2097 – 1931. 2023. 06. 009
- [26] 孙彦, 赵雪雁. 山区农户的生计干预效率及其影响因素——以陇南山区为例[J]. 地理研究, 2023, **42**(7): 1874 – 1891. [SUN Yan, ZHAO Xueyan. Efficiency and influencing factors of livelihood interventions of farming households in mountainous areas: A case study of Longnan mountainous areas [J]. *Geography Research*, 2023, **42**(7): 1874 – 1891] DOI: 10.11821/dlyj020220867
- [27] 高伟, 李欣悦, 张远, 等. 长江流域生态系统服务价值时空演变与预测[J]. 生态学报, 2023, **43**(15): 6203 – 6211. [GAO Wei, LI Xinyue, ZHANG Yuan, et al. Evolution and prediction of ecosystem service value of the Yangtze River Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(15): 6203 – 6211] DOI: 10.5846/stxb202104221062
- [28] 杨磊, 刘凤莲. 昆明市生态系统服务价值时空演变及驱动因素研究[J]. 国土资源导刊, 2023, **20**(4): 125 – 136. [YANG Lei, LIU Fenglian. Study on spatio-temporal evolution and driving factors of ecosystem service value in Kunming prefecture [J]. *Land and Resources Herald*, 2023, **20**(4): 125 – 136]
- [29] 王檬. 秦巴山区土地生态系统服务价值及其时空演变研究[D]. 成都: 四川大学, 2022: 1 – 81. [WANG Meng. The research on the service value of land ecosystem and its spatio-temporal evolution in Qinba Mountain area [D]. Chengdu: Sichuan University, 2022: 1 – 81] DOI: 10.27342/d. cnki. gsedu. 2021. 000475
- [30] 曹倡景, 张璐, 梁通, 等. 黄河砒砂岩区土地利用生态系统服务价值响应[J]. 水土保持研究, 2024, **31**(5): 337 – 343. [CAO Changjing, ZHANG Lu, LIANG Tong, et al. Response to the value of land use ecosystem services in the sandstone area of the Yellow River [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, **31**(5): 337 – 343] DOI: 10.13869/j. cnki. rswc. 2024. 05. 036
- [31] 梁仕豪, 李文, 高宇, 等. 吉林省生态系统服务价值与景观生态风险关联性及其空间分异[J]. 应用生态学报, 2024, **35**(3): 769 – 779. [LIANG Shihao, LI Wen, GAO Yu, et al. Correlations between ecosystem service value and landscape ecological risk and its spatial heterogeneity in Jilin Province, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, **35**(3): 769 – 779] DOI: 10.13287/j. 1001 – 9332. 202403. 022
- [32] 周建伟, 罗君, 马雪洋. 拉萨河流域土地利用与生态系统服务价值时空演变及驱动因素[J]. 干旱区研究, 2024, **41**(6): 1021 – 1031. [ZHOU Jianwei, LUO Jun, MA Xueyang. Spatial-temporal evolution and driving factors of land use and ecosystem service value in Lhasa River Basin, China [J]. *Arid Zone Research*, 2024, **41**(6): 1021 – 1031] DOI: 10.13866/j. azr. 2024. 06. 11
- [33] 蒙子钰, 卢远, 汤传勇, 等. 欠发达山区农户生计恢复力测度——以广西凤山县为例[J]. 山地学报, 2023, **41**(4): 584 – 596. [MENG Ziyu, LU Yuan, TANG Chuanyong, et al. Measurement of the livelihood resilience of farmers in underdeveloped mountainous areas: A case study of Fengshan County, Guangxi, China [J]. *Mountain Research*, 2023, **41**(4): 584 – 596] DOI: 10.16089/j. cnki. 1008 – 2786. 000772
- [34] 高振斌, 王小莉, 苏婧, 等. 基于生态系统服务价值评估的东江流域生态补偿研究[J]. 生态与农村环境学报, 2018, **34**(6): 563 – 570. [GAO Zhenbin, WANG Xiaoli, SU Jing, et al. Ecological compensation of Dongjiang River Basin based on evaluation of ecosystem service value [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, **34**(6): 563 – 570] DOI: 10.11934/j. issn. 1673 – 4831. 2018. 06. 012
- [35] 李佳桐, 唐海萍, 邝佛缘. 国家公园生态系统服务与农牧户福祉的时空耦合分析——以祁连山国家公园为例[J]. 生态学报, 2024, **44**(15): 6527 – 6539. [LI Jiatong, TANG Haiping, KUANG Foyuan. Spatial-temporal coupling analysis of ecosystem services and well-being of farmers and herdsman: A case study of Qilian Mountain National Park [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, **44**(15): 6527 – 6539] DOI: 10.20103/j. stxb. 202310072154
- [36] SANTOS-MARTIN F, ZORRILLA-MIRAS P, PALOMO I, et al. Protecting nature is necessary but not sufficient for conserving ecosystem services: A comprehensive assessment along a gradient

- of land-use intensity in Spain [J]. *Ecosystem Services*, 2019, **35**: 43 – 51] DOI: 10.1016/j.ecoser.2018.11.006
- [37] 王丹, 兰安军, 范泽孟, 等. 典型喀斯特区域土地利用变化对生态系统服务价值的响应情景模拟[J]. *水土保持研究*, 2024, **31**(4): 308 – 315 + 325. [WANG Dan, LAN Anjun, FAN Zemeng, et al. Scenario modeling of response of land use change to ecosystem service values in a typical karst region [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, **31**(4): 308 – 315 + 325] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.036
- [38] 何江润, 吴艳艳, 吴志峰. 粤港澳大湾区湿地生态系统服务及价值评估研究进展及展望[J]. *生态科学*, 2024, **43**(2): 271 – 280. [HE Jiangrun, WU Yanyan, WU Zhifeng. Research progress and prospects of wetland ecosystem services and value assessment in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. *Ecological Science*, 2024, **43**(2): 271 – 280] DOI: 10.14108/j.cnki.1008 – 8873.2024.02.030
- [39] 唐秀美, 刘敏, 吴悠, 等. 国土综合整治与生态修复对区域生态系统服务价值的影响评估[J]. *生态学报*, 2024, **44**(14): 5974 – 5984. [TANG Xiumei, LIU Min, WU You, et al. Impacts of comprehensive consolidation and ecological restoration of land space on ecosystem service value [J]. *Acta Ecologica Sinica* 2024, **44**(14): 5974 – 5984] DOI: 10.20103/j.stxb.202310102185
- [40] 张婕, 古明敏, 王陈. 基于共享视角的黄河流域综合生态补偿机制[J]. *中国人口·资源与环境*, 2024, **34**(3): 192 – 204. [ZHANG Jie, GU Mingmin, WANG Chen. Comprehensive ecological compensation mechanisms of the Yellow River Basin from the sharing perspective [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2024, **34**(3): 192 – 204] DOI: 10.12062/cpre.20230341
- [41] 赵晶晶, 葛颜祥, 李颖. 协同引擎、外部环境与流域生态补偿多主体协同行为研究——以山东省大汶河流域为例[J]. *中国环境管理*, 2023, **15**(4): 130 – 139. [ZHAO Jingjing, GE Yanxiang, LI Ying. Research on multi-agent collaboration behavior of collaboration engine, external environment and watershed eco-compensation: A case study of Dawen River Basin in Shandong Province [J]. *Chinese Environmental Management*, 2023, **15**(4): 130 – 139] DOI: 10.16868/j.cnki.1674 – 6252.2023.04.130
- [42] 许信. 基于生态系统调节服务价值评估的生态补偿标准研究——以鄱阳湖地区为例[D]. 南昌: 江西财经大学, 2023: 1 – 51. [XU Xin. Ecological compensation based on the assessment of the value of ecosystem regulation services standard study-taking the Poyang Lake region as an example [D]. Nanchang: Jiangxi University of Finance and Economics, 2024: 1 – 51] DOI: 10.27175/d.cnki.gjxcu.2023.000642
- [43] 肖建英, 戴津津, 方昕然, 等. 基于 PLUS 模型的徐州市生态系统服务价值多情景模拟研究[J]. *中国土地科学*, 2024, **38**(4): 125 – 134. [XIAO Jianying, DAI Jinjin, FANG Xinran, et al. Multiple scenario simulation of ecosystem service value in Xuzhou City based on PLUS model [J]. *China Land Science*, 2002, **38**(4): 125 – 134] DOI: 10.11994/zgtdkx.20240320.171338

Analysis on Coupling between Ecological Service Value and Farmers' Livelihood in Mountainous Border Areas of Guangxi, China and Associated Ecological Compensation

HUANG Qunying¹, WU Shiyin¹, WEI Zhenfeng^{1,2*}, WEN Xue¹

(1. *Economic and Trade College, Guangxi University of Finance and Economics, Nanning 530000, China;*

2. *Guangxi Institute of Finance and Economics, Nanning 530000, China)*

Abstract: China's mountainous borderlands, characterized by geopolitical sensitivities, coexisting ecological fragility and biocultural diversity, peripheral economies with transboundary dependencies, and multi-ethnic cultural landscapes, form a coupled human-natural system where the degradation of ecological barriers and livelihood space reconfiguration creates a critical paradox for sustainable territorial governance. Resolving the “ecology-livelihood-development nexus” in these transitional zones requires a complexity-driven framework to advance precision rural revitalization, adaptive landscape stewardship, and cross-scale compensation mechanisms that address trans-

jurisdictional externalities.

In this study, it took the border regions of Guangxi Province, China as an example, employing the ecological equivalent factor method, ecological coupling models, and ecological compensation methods to analyze the evolution of ecosystem service value from 2004 to 2021 and explore livelihood-ecological coupling mechanisms and the implementation effects of compensation policies.

(1) The total ESV in mountainous border areas of Guangxi showed an upward trend, increasing from 44.71 billion CNY in 2004 to 52.156 billion CNY in 2021. Forest ecosystems contributed 52.64% of this value, underscoring forests' dominant role as integrated carriers of ecological services.

(2) The regional livelihood-ecosystem coupling system predominantly exhibited low to moderate coupling levels, demonstrating a gradient coordination evolution from low (37.5%) to moderate (62.5%). The coordination degree increased annually by 29.28%, yet significant spatial disparities persisted. In port cities (Dongxing and Pingxiang), livelihood strategy transitions driven by cross-border trade led to structural imbalances in ecosystem service supply-demand, manifesting as moderate dysfunction spatial distribution is uneven and insufficient synergy between livelihoods and ecological environments.

(3) Total amount of ecological compensation had a stepwise decline from 38.563 billion CNY to 20.26 billion CNY. Napo and Ningming counties were identified as priority compensation zones, while other counties were lower demand. Spatial allocation disparities in compensation policies emerged as the key driver of efficiency attenuation.

This research provides scientific evidence for formulating ecological construction and livelihood revitalization policies in Guangxi border areas, while offering decision-making references for spatially differentiated sustainable development governance.

Key words: ecosystem service value; farmers' livelihood; ecological compensation; Guangxi border area

(责任编辑 钟雨倩)