

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2026.05.041

CSTR:32310.14.stbxb.2026.05.041

周昌焰,黄艳春,马月伟,等.顾及空间尺度的滇中城市群生态系统服务权衡关系[J].水土保持学报,2026,40(5):483-496.

Zhou Changyan, Huang Yanchun, Ma Yuewei, et al. Ecosystem service trade-offs in Central Yunnan urban agglomeration considering spatial scales [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(5): 483-496.

顾及空间尺度的滇中城市群生态系统服务权衡关系

周昌焰,黄艳春,马月伟,熊世巧,刘忠翠,左 珩

(西南林业大学水土保持学院,昆明 650224)

摘要: [目的] 探明滇中城市群不同空间尺度下生态系统服务的时空格局,深度揭示服务间权衡协同关系的尺度依赖效应与非线性演变规律。[方法] 基于 InVEST 模型、MaxEnt 模型及 GIS 空间分析,对 2003—2023 年滇中城市群 6 类关键生态系统服务进行量化评估;综合运用皮尔逊相关分析、双变量空间自相关及生产可能性边界-边际转换率(PPF-MRT)模型,系统解析各服务的时空演变特征、多尺度权衡强度及相变阈值。[结果] 1) 2003—2023 年,研究区产水量、土壤保持量、粮食供给量与休闲游憩服务增幅均超 20%,碳储量与生境质量呈先降后升波动特征;空间上形成外围屏障区主导调节与生产、核心城镇区主导休闲游憩的功能互补格局。2) 生态系统服务权衡与协同具有显著尺度依赖性,格网尺度受土地排他性制约呈绝对权衡,县域尺度因空间缓冲效应转化为结构性区间约束,权衡关系未因尺度上推而根本消解。3) PPF-MRT 模型精准测度服务转换的非线性边界,格网尺度下碳储量-休闲游憩与土壤保持-产水量分别在跨越阈值 $X_0=0.235$ 与 $X_0=0.147$ 后由协同转负向权衡;县域尺度下粮食供给-生境质量在主体区间 $0.077 < X < 0.832$ 内呈稳定负向权衡。[结论] 滇中城市群生态系统服务权衡关系具有显著的尺度依赖性,意味着需以非线性相变阈值为基础,构建多尺度嵌套的空间管治策略,统筹微观底线约束与宏观功能协同,以推进喀斯特石漠化地区的生态修复与可持续治理。

关键词: 生态系统服务; 权衡与协同; 生产可能性边界; 权衡强度; 滇中城市群

中图分类号: X171.1; S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)05-0483-14

Ecosystem Service Trade-offs in Central Yunnan Urban Agglomeration Considering Spatial Scales

Zhou Changyan, Huang Yanchun, Ma Yuewei, Xiong Shiqiao, Liu Zhongcui, Zuo Bei

(College of Soil and Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: [Objective] This study aims to identify the spatiotemporal patterns of ecosystem services (ES) across multiple spatial scales in the central Yunnan urban agglomeration (CYUA), and to provide an in-depth analysis of the scale-dependent effects and non-linear evolutionary patterns of ES trade-offs and synergies. [Methods] Six critical ESs from 2003 to 2023 were quantified utilizing the InVEST model, MaxEnt model, and GIS-based spatial analysis. Furthermore, the spatiotemporal evolution characteristics, multi-scale trade-off intensities, and phase-transition thresholds of each service were systematically analyzed through an integrated framework comprising Pearson correlation analysis, bivariate spatial autocorrelation, and the production possibility frontier-marginal rate of transformation (PPF-MRT) model. [Results] 1) Between 2003 and 2023, water yield, soil conservation, food supply, and leisure and recreation services in the study area increased by over 20%, while carbon storage and habitat quality exhibited a fluctuating pattern of first decreasing and then increasing. Spatially, a complementary functional pattern was formed, characterized by peripheral barrier zones dominated by regulation and production functions, and core urban areas dominated by recreational functions. 2) Ecosystem service trade-

收稿日期: 2026-04-20

修回日期: 2026-06-11

录用日期: 2026-06-18

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-08-27

资助项目: 国家自然科学基金项目(41201587); 云南省水土保持与荒漠化防治学一流学科开放课题项目(SBK20240034); 云南省哲学社会科学规划项目(YB202430)

第一作者: 周昌焰(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事生态系统服务与区域发展研究。E-mail: changyanzhou@126.com

通信作者: 马月伟(1980—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事区域发展、生态系统服务与遗产保护研究。E-mail: mayuewei007@126.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

offs and synergies exhibited significant scale dependency. Constrained by the physical exclusivity of land use, the grid scale manifested absolute trade-offs. Conversely, due to spatial buffering effects, the county scale transformed into structural interval constraints, indicating that trade-off relationships were not fundamentally eliminated by the upward shift in scale. 3) The PPF-MRT model precisely delineated the non-linear boundaries of service transitions. At the grid scale, carbon storage-leisure and recreation and soil conservation-water yield shifted from synergy to negative trade-offs after crossing the thresholds of $X_0=0.235$ and $X_0=0.147$, respectively. At the county scale, food supply-habitat quality exhibited a stable negative trade-off within the primary interval of $0.077 < X < 0.832$. [Conclusion] The trade-off relationships among ESs in the central Yunnan urban agglomeration exhibit significant scale dependency. This necessitates the development of multi-scale nested spatial governance strategies rooted in non-linear phase-transition thresholds. By integrating micro-level baseline constraints with macro-level functional synergies, such strategies can effectively advance ecological restoration and sustainable governance in karst rocky desertification areas.

Keywords: ecosystem services; trade-offs and synergies; production possibility frontier; trade-off intensity; central Yunnan urban agglomeration

Received: 2026-04-20

Revised: 2026-06-11

Accepted: 2026-06-18

Online(www.cnki.net): 2026-08-27

生态系统服务(ecosystem services, ES)系指人类从生态系统结构、功能与过程中直接或间接获取的产品与服务,涵盖供给、调节、支持及文化服务4种类型,是维系人类社会福祉与区域可持续发展的关键纽带^[1]。生态系统服务之间通常呈现此消彼长的权衡关系,或同增同减的协同关系^[2]。在全球气候变化与高强度人类活动双重胁迫下,生态系统结构与功能发生深刻演变,不同服务类型间的权衡与协同格局也日趋复杂。科学量化并解析生态系统服务权衡的形成机制与演变规律,已成为当前地理学、生态学、水土保持科学与环境科学等多学科交叉研究的前沿^[3-4]。特别是在面临严峻石漠化威胁的生态脆弱区,精准识别生态系统服务之间的冲突节点,探明其时空演变特征,对于科学推进石漠化治理、落实国家生态文明建设战略及实现可持续发展目标(SDGs)具有不可替代的理论价值与现实指导意义^[5]。

近年来,生态系统服务权衡研究已从单一服务的静态评估,转向多服务、多尺度、多过程耦合的动态综合模拟与优化调控。方法层面,皮尔逊相关分析^[6]、均方根误差^[7]、双变量空间自相关^[8]等手段在量化服务间作用方向、强度和空间格局中得到广泛应用;空间尺度覆盖流域^[9]、城市^[10]和城市群^[11]等多个层级;研究内容从权衡协同关系的时空格局识别,逐步延伸至驱动机制解析^[12]、分区分管^[13]及未来情景模拟^[14]等。然而,多数研究在关注空间多尺度与方法综合维度上仍存在局限。首先,生态系统服务权衡具有显著的空间尺度依赖性,既有研究多聚焦单一尺度,对多尺度权衡特征的一体化解析尚显不足。

网格尺度可精细刻画微观过程与空间异质性,利于差异化调控;县级尺度作为政策落地与空间管控的基本单元,更具宏观指导价值,忽视多尺度耦合效应将制约区域社会-生态系统的可持续发展和治理^[3]。其二,传统线性相关分析仅能判别权衡方向或空间格局,难以测度权衡的绝对强度、非线性形态与效用边界。近年来,经济学中的生产可能性边界(PPF)理论被引入生态系统服务权衡研究,其可有效突破传统线性评估的局限,精准揭示服务转换的非线性阈值,为刻画多服务供给能力与权衡效率提供了新视角^[15]。但将多源模型、PPF理论与权衡方向判别及空间格局测度方法相耦合,并置于多尺度框架下展开系统解析的研究仍较为匮乏。鉴于此,引入上述集成框架,对于突破单一线性分析局限、量化多尺度非线性权衡强度具有重要的创新价值与科学意义。

滇中城市群位于云南省中部,是国家级城市群之一,也是我国西南地区重要的经济增长极和面向南亚东南亚辐射中心的核心区。该区域地处云贵高原喀斯特地貌区,岩溶发育强烈,石漠化问题突出,是我国西南生态安全屏障的重要组成部分^[16]。根据水利部发布的《中国水土保持公报(2025年)》^[17],我国西南岩溶地区水土流失及石漠化问题依然严峻,严重制约着区域高质量发展与生态安全。随着近年来滇中城市群工业化与城镇化进程加速,大规模建设用地扩张及农业垦殖导致该区域植被退化与水土流失加剧,石漠化潜在风险显著上升^[18]。新型城镇化推进与石漠化生态修复双重压力交织下,土壤保持与粮食生产、休闲游憩与生境质量等生态系统服

务间的权衡冲突愈趋尖锐^[19]。如何在石漠化易发区辨识关键生态系统服务权衡的空间多尺度分异特征及其尺度效应?这不仅是揭示喀斯特山地生态退化与恢复机制的关键科学问题,更是当前突破石漠化治理瓶颈、实现水土流失综合防治的迫切需求。

本研究以滇中城市群为研究区,集成多源遥感与社会经济数据,耦合InVEST模型与MaxEnt模型,系统评估2003—2023年格网与县域尺度下6类关键生态系统服务的时空演变特征。针对传统线性评估难以刻画服务转换代价与非线性规律的局限,本研究引入生产可能性边界-边际转换率(PPF-MRT)模型,并结合皮尔逊相关及双变量空间自相关分析,深度解析生态系统服务交互关系的尺度依赖效应,精准测度服务间权衡关系的非线性相变拐点与协同区间。旨在通过揭示多尺度服务的复杂作用机制,为喀斯特石漠化地区落实“三区三线”管治、优化国土空间格局及实施多尺度差异化生态修复策略提供精准的量化支撑与科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

滇中城市群(23°19′~27°03′N, 100°43′~104°49′E)地处云贵高原腹地,总面积约 $11.14 \times 10^4 \text{ km}^2$,涵盖昆明市、曲靖市、玉溪市、楚雄州及红河州北部共49个县、市、区(图1)。区域内地势北高南低,属亚热带高原季风气候。

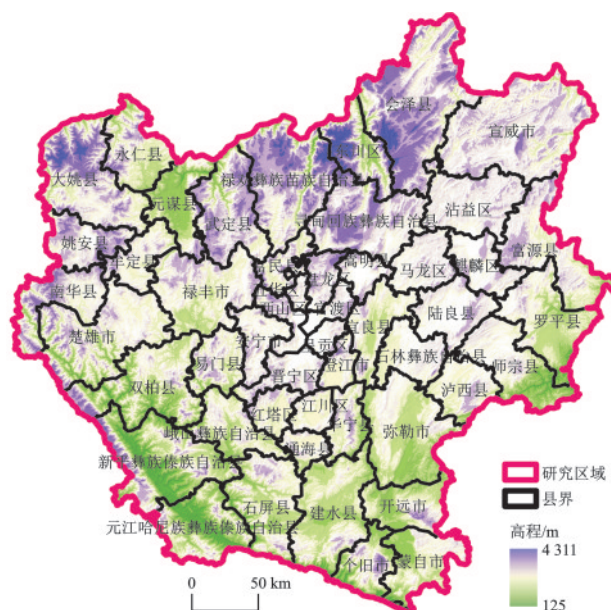


图1 滇中城市群区位

Fig.1 Location of central Yunnan urban agglomeration

作为长江、珠江、红河三大水系分水岭及高原湖泊密集分布区,研究区是中国西南生态安全屏障的关键节点。集中了云南省2/3的坝区优质耕地,承担

水源涵养、水土保持、粮食供给和文化游憩等多重生态功能,2023年城镇化率已逾65%,为全省社会经济的核心地带^[19]。然而,高强度城镇化扩张与喀斯特地貌的脆弱本底相互叠加,致使区域面临生境退化、河湖污染、水资源约束与土地石漠化等多重胁迫^[18],生态系统稳定性与可持续发展面临严峻考验。

1.2 数据来源与处理

本研究涉及的数据类型涵盖土地利用、气候、土壤、高程和社会经济等方面,各项数据名称、精度与来源见表1。社会经济数据主要源自各级政府部门发布的统计年鉴与公报。所有栅格数据统一重采样至1 000 m空间分辨率,并转换至WGS_1984_UTM_Zone_48N投影坐标系,以确保空间基准一致。在此基础上,以县级行政边界为统计单元,借助ArcGIS 10.8软件对网格数据进行分区统计,取像元平均值作为对应尺度的生态系统服务指标值。上述处理保持空间一致性,降低尺度转换带来的信息损失与聚合偏差,增强多源数据的可比性与分析结论的可靠性。

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统服务量化评估 本文基于生态系统服务理论框架,结合滇中城市群的生态本底特征与战略定位,选取碳储量(carbon storage, CS)、生境质量(habitat quality, HQ)、产水量(water yield, WY)、土壤保持量(soil conservation, SC)、粮食供给量(food supply, FS)和休闲游憩(leisure and recreation, LR)6项关键指标,用以综合表征区域生态系统的供给、调节、支持与文化4类服务功能。

1) 碳储量

基于InVEST模型碳储量模块,结合土地利用数据与多碳库密度参数,刻画滇中城市群年平均碳储量的空间格局,计算公式^[20]为:

$$C_{\text{tot}} = C_a + C_b + C_s + C_d \quad (1)$$

式中: C_{tot} 为某栅格单元的总碳储量,t; C_a 、 C_b 、 C_s 、 C_d 分别为地上生物量、地下生物量、土壤碳储量和枯落物碳储量,t。

2) 生境质量

运用InVEST模型生境质量模块,输入土地利用、胁迫因子及其空间衰减特征与生境敏感性参数,评估逐年生境质量的空间分异,计算公式^[21]为:

$$HQ_{xj} = H_j \times \left(1 - \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \quad (2)$$

式中: HQ_{xj} 为栅格 x 在土地利用类型 j 下的生境质量值; H_j 为土地利用类型 j 的生境适宜性得分,取值为0~1; D_{xj} 为栅格 x 在土地利用类型 j 下的综合威胁程度; z 为缩放参数,通常取值为2.5; k 为半饱和常数,通常取值为0.5。

表 1 数据名称、精度及来源
Table 1 Data name, accuracy, and sources

数据名称	精度	数据来源
年平均降水量	1 km	国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn/)
年平均气温	1 km	
潜在蒸散发	1 km	
土壤	1 km	世界土壤数据库(https://search.earthdata.nasa.gov/)
高程	30 m	地理空间数据云平台(https://www.gscloud.cn/)
坡度	30 m	由高程数据提取
NDVI	500 m	NASA 地球科学数据网站(https://nasadaacs.eos.nasa.gov/)
土地利用	30 m	CLCD 数据集(https://doi.org/10.5281/zenodo.5816591)
人口密度	1 km	LandScan 平台(https://landscan.ornl.gov/)
POI	矢量	高德地图(https://ditu.amap.com/)
道路	矢量	OpenStreetMap 平台(http://www.openstreetmap.org)
河流	矢量	

3)产水量

借助 InVEST 模型产水量模块,集成气象、地形、土壤与植被覆盖等数据,采用简化水量平衡算法,模拟年平均产水量的空间分布,计算公式^[19]为:

$WY(x)=P(x)-AET(x)$ (3)

$AET(x)=P(x)\times\frac{1}{1+\left[\frac{P(x)}{PET(x)}\right]^\omega}$ (4)

式中:WY(x)为像元x的年产水量,mm;P(x)为年降水量,mm;AET(x)为实际蒸散发量,mm;PET(x)为潜在蒸散发量,mm;ω为与土壤特性、土地覆盖类型及植被根深相关的调节系数。

4)土壤保持量

依托 InVEST 模型泥沙输移比模块,融合 RUSLE 与泥沙输移动力学机制,利用地形、气候、土壤及土地利用数据,揭示各年土壤保持服务的空间分异格局,计算公式^[22]为:

$SC_i=R_i\times K_i\times LS_i\times(1-V_i\times M_i)$ (5)

式中:SC_i为像元i的土壤保持量;R_i为降雨侵蚀力因子;K_i为土壤可蚀性因子;LS_i为坡长坡度因子;V_i为植被覆盖与管理因子;M_i为水土保持措施因子。

5)粮食供给量

采用 NDVI-粮食转化法,利用 NDVI、粮食产量与耕地数据,估算各研究年份粮食供给能力的空间分布,计算公式^[19]为:

$FS(x)=\left[\frac{NDVI(x)}{NDVI_{sum}}\right]\times G_{sum}$ (6)

式中:FS(x)为单元格x的粮食供给量,t;NDVI(x)为该单元格的植被指数;NDVI_{sum}为研究区耕地的 NDVI 总和;G_{sum}为研究区总粮食产量。

6)休闲游憩

利用 MaxEnt 模型,整合休闲游憩兴趣点(POI)与自然环境、空间距离等 6 项环境要素,模拟休闲游憩服务供给的空间格局,计算公式^[23]为:

$E(LR_p/Z)=-\sum_i^n q(LR_p,Z)\log q(LR_p,Z)$ (7)

$LR^*=\operatorname{argmax} E(LR_p/Z)$ (8)

式中:LR_p为游憩服务相关 POI 分布点位;Z 为环境变量,选取 DEM、地形起伏度、土地利用、距水体距离、距道路距离、NDVI 作为环境变量;n 为训练样本数量;q(LR_p, Z)为概率函数;E(LR_p/Z)为训练样本的信息熵;LR*为最大熵分布。

1.3.2 全局权衡与协同关系检验 采用皮尔逊(Pearson)相关分析法,评估 ES 之间的权衡与协同关系,计算公式^[6]为:

$r_{ab}=\frac{\sum_{i=1}^N[(a_i-\bar{a})(b_i-\bar{b})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N(a_i-\bar{a})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^N(b_i-\bar{b})^2}}$ (9)

式中:r_{ab}为生态系统服务 a 与 b 的皮尔逊相关系数。r_{ab}>0 表明二者呈空间协同关系,r_{ab}<0 则呈权衡关系,绝对值越接近 1 关系越强;N 为特定尺度下评估单元总数,即县级总数或 1 km 网格总数;a_i与 b_i为第 i 个单元 2 种服务的量化值; $\bar{a}$ 与 $\bar{b}$ 为对应平均值。

1.3.3 局部权衡与协同空间格局识别 为识别不同生态系统服务之间在空间上的权衡与协同关系,采用双变量局部 Moran's I 指数进行分析,计算公式^[8]为:

$I_i=(a_i-\bar{a})\sum_{j=1}^Nw_{ij}(b_j-\bar{b})$ (10)

式中:I_i为评价单元 i 的局部 Moran's I 指数;a_i、b_j分别为单元 i 和其邻近单元 j 上的 2 个生态系统服务值; $\bar{a}$ 与 $\bar{b}$ 分别为 2 个变量的全域平均值;w_{ij}为空间权重矩阵。根据 I_i值及其显著性(本研究以 p<0.05 为显著

标准),可以识别 4 种典型空间结构类型:高-高集聚(高值协同)、低-低集聚(低值协同)、高-低集聚(高值-低值权衡)与低-高集聚(低值-高值权衡)。

1.3.4 基于 PPF-MRT 的非线性权衡特征测度 为克服传统相关性分析无法刻画权衡强度与转换成本的局限,本研究引入生产可能性边界-边际转换率(production possibility frontier-marginal rate of transformation,PPF-MRT),对 6 类 ES 之间的权衡与协同关系进行精细化测度。具体步骤及公式^[15]为:

1)数据标准化

为消除量纲影响,首先采用极值归一化方法将所有服务值标准化至[0,1]区间:

$$S_{im} = \frac{U_{im} - \min(U_m)}{\max(U_m) - \min(U_m)} \quad (11)$$

式中: S_{im} 为标准化值; U_{im} 为样本 i 在服务 m 上的原始值; $\min(U_m)$ 和 $\max(U_m)$ 分别为该服务的最小值和最大值。

2)帕累托最优筛选

对于服务 a 和 b ,设标准化值为 $s_{a,i}$ 和 $s_{b,i}$ 。帕累托最优定义为不存在其他点 j 使得 $s_{a,j} \geq s_{a,i}$ 且 $s_{b,j} \geq s_{b,i}$,且至少有一个严格不等式成立。所有帕累托最优点构成帕累托前沿:

$$PF = \left\{ (s_{a,i}, s_{b,i}) \mid \nexists j: (s_{a,j} \geq s_{a,i} \wedge s_{b,j} \geq s_{b,i}) \wedge (s_{a,j} > s_{a,i} \vee s_{b,j} > s_{b,i}) \right\} \quad (12)$$

3)生产可能性边界拟合

采用多项式函数拟合帕累托前沿:

$$f(s_a) = \sum_{k=0}^T c_k s_a^{T-k} \quad (13)$$

式中: $f(s_a)$ 为帕累托前沿拟合值; s_a 为自变量; T 为多项式最高次数; k 为求和索引; c_k 为第 k 项系数; s_a^{T-k} 为降幂排列的单项式。

4)边际转换率计算

对拟合曲线求一阶导数,得到边际转换率:

$$MRT = -\frac{ds_b}{ds_a} = -\sum_{k=0}^{T-1} (T-k)c_k s_a^{T-k-1} \quad (14)$$

式中:MRT 为边界转换率,其正负反映服务间关系性质:MRT>0 表示协同效应,MRT<0 表示权衡效应。通过求解 MRT=0 得到协同与权衡的转换阈值。

5)权衡强度计算

权衡强度定义为数据集均值点 P 到拟合曲线的最短欧氏距离:

$$TI = \min_{s_a \in [0,1]} \sqrt{(\bar{s}_a - s_a)^2 + [\bar{s}_b - f(s_a)]^2} \quad (15)$$

式中:TI 为权衡强度; $(\bar{s}_a, \bar{s}_b)$ 为 2 项服务标准化值的均值点。TI 值越大,表示 2 项服务之间的权衡关系越强。

2 结果与分析

2.1 多尺度生态系统服务的时空演变特征

2.1.1 格网尺度下的空间分异与演变 2003—2023 年,滇中城市群各 ES 平均值在格网尺度上总体呈增长态势,但演化轨迹分化明显(表 2)。具体而言,CS 与 HQ 表现为前期小幅减少、后期恢复增长的波动特征,至 2023 年分别达到 13 216.93 t 和 0.743 6,总体略高于 2003 年水平,表明在严守生态保护红线与推进造林绿化的背景下,区域植被碳汇功能与生物多样性维持功能在经历初期扰动后已逐步趋于改善。WY 由 312 133 m³持续升至 383 082 m³,增幅显著,该变化可能受到区域降水格局年际波动及城镇硬化地表扩张导致产流能力增强的综合影响。SC 从 51 132.00 t 持续增至 63 436.21 t,反映出退耕还林还草及石漠化综合治理工程对水土流失防控的积极成效。FS 呈现前期快速攀升、后期高位稳定的演进特征,由 47.51 t 大幅增至 66.17 t,表明农业技术进步与集约化经营有效提升了区域农业生产力;LR 从 0.170 1 稳步增至 0.208 4,反映出在区域经济发展与人口集聚背景下,社会对生态系统文化服务的需求持续增强,推动其功能不断转化提升。

表 2 2003—2023 年滇中城市群格网尺度生态系统服务平均值

Table 2 Mean values of ecosystem services at grid scale in central Yunnan urban agglomeration (2003—2023)

年份	碳储量/t	生境质量	产水量/m ³	土壤保持量/t	粮食供给量/t	休闲游憩
2003	13 191.598 6	0.742 6	312 132.975 3	51 132.001 3	47.509 3	0.170 1
2013	13 153.031 3	0.735 3	355 801.542 5	58 409.014 9	65.962 0	0.174 8
2023	13 216.932 8	0.743 6	383 081.967 6	63 436.212 7	66.171 9	0.208 4

滇中城市群 2003—2023 年 6 类关键生态系统服务空间分异特征显著(图 2)。CS 与 HQ 呈“西高东低”分布态势,高值区集中于林木茂密的楚雄、玉溪及曲靖北部,低值区则沿城镇扩张轴线分布于滇池、抚仙湖等人类活动扰动强烈地带,可能与新型城镇化进程中高强度的人类活动及建设用地扩张对生态

空间的长期挤压存在一定关联。WY 与 SC 高值区高度叠合,主要位于降水丰沛、植被覆盖度较高的西南部与东北部山区,低值区则多分布在蒸散作用显著的昆明中部及土壤侵蚀风险偏高的农业活跃区域,其空间格局在较大程度上可能受到地形地貌起伏与水热本底条件的协同调制。FS 依托曲靖、楚雄的耕

地资源优势形成高产集聚区;LR则呈明显向心分布,形成以昆明为核心、曲靖为次中心的圈层式辐射结

构,与区域经济中心的人口集聚效应及公众游憩消费需求

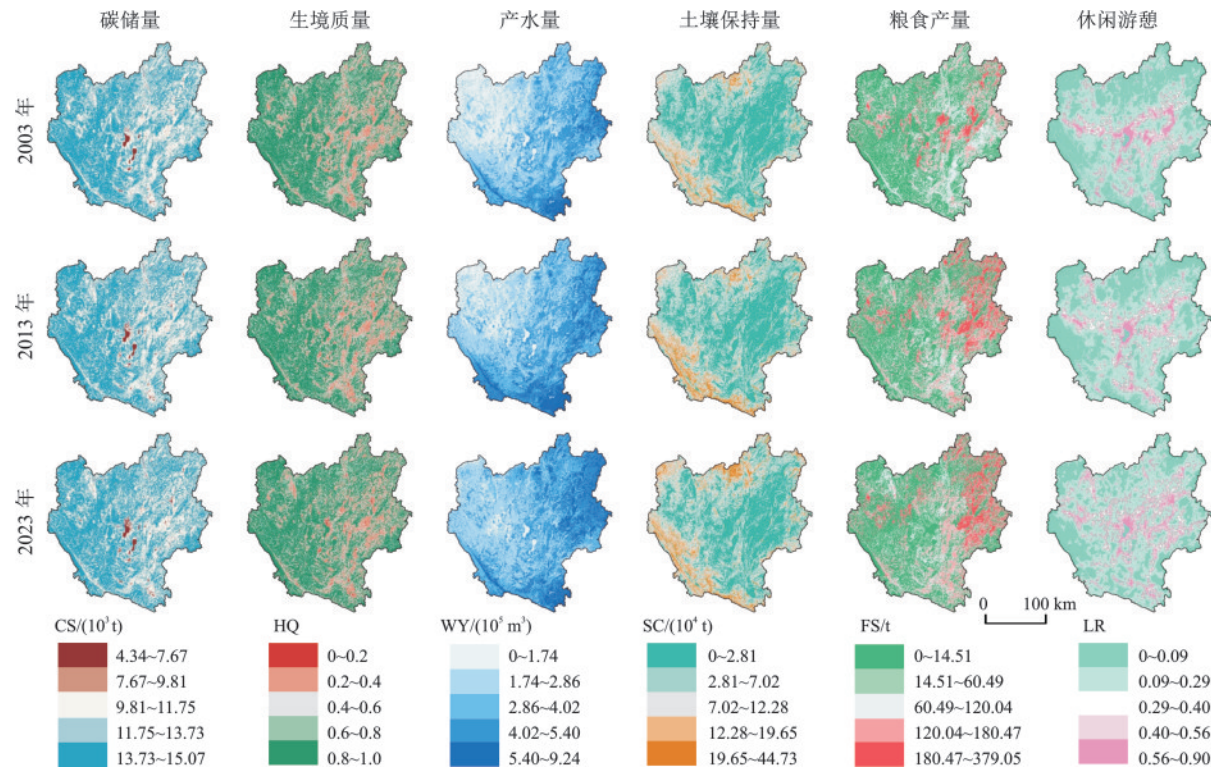


图 2 2003—2023 年滇中城市群各项生态系统服务格网尺度空间格局

Fig.2 Spatial patterns of ecosystem services at grid scale in central Yunnan urban agglomeration (2003—2023)

2.1.2 县域尺度下的功能分区演化 县级尺度上,2003—2023 年滇中城市群各 ES 空间格局呈明显的“功能分区演化”态势(图 3)。宣威、会泽等县市依托其天然生态基底与传统农业优势,持续主导区域 CS、WY、SC 及 FS 供给,承担着生态屏障与粮食生产双重功能,可能与区域主体功能定位的长期引导密切相关。金沙江流域的永仁、元谋、大姚等县,SC 服务实现显著跃升并构成土壤保持功能强化的重点区域,在一定程度上反映出长江防护林建设及石漠化综合治理等区域重点生态工程的积极成效。以呈贡、官渡、五华为代表的城镇核心区,虽受人为活动扰动较强,但 LR 仍保持领先优势,CS 与 HQ 亦呈现恢复性增长,可能得益于近年来新型城镇化进程中城市生态修补与绿地景观系统完善政策的持续推进。总体来看,在宏观空间规划差异化管控的引导下,滇中城市群各县级市单元 ES 演化逻辑已呈现出由早期的开发损耗转向差异化修复与协同提升的态势,形成外围屏障区高调节功能、核心城镇区高文化功能的

2.2 多尺度生态系统服务的权衡与协同关系

2.2.1 权衡与协同关系的全局统计特征 皮尔逊相关分析显示,滇中城市群在 2003 年、2013 年及 2023

年的格网与县级尺度上,权衡关系持续存在且格局稳定(图 4)。格网尺度下,CS-FS、CS-WY、FS-HQ、HQ-WY 及 LR 与 CS、HQ、SC 等服务均呈显著负相关,尤以 HQ-WY 的权衡程度最高。可能主要源于微观像元内土地利用的物理排他性,如城镇扩张或农业垦殖等对自然生态空间的直接挤占。其中,HQ-WY 的剧烈权衡可能暗示城镇硬化地表扩张在增加地表径流的同时,也对自然生境造成直接扰动。县级尺度则集中体现为 LR 与 CS、FS、SC、WY、HQ 之间的普遍权衡,其中 CS-LR 的负相关程度随时间推移持续强化,而 SC-LR 的权衡程度则呈现出先略降后显著上升的波动增强态势,FS-HQ 亦呈持续负相关态势。在一定程度上反映宏观国土空间布局中,社会经济发展与生态屏障保护之间的深层权衡。而 FS-HQ 的持续负相关,则暗示在脆弱喀斯特背景下保障地方粮食供给与实施生境保育之间的固有空间冲突。上述结果表明,尽管区域发展路径与政策调控有所调整,生态系统功能冲突并未根本缓解,核心权衡关系在 2 个尺度上均呈现跨时序的结构稳定性。反映出人类活动对生态空间的持续性挤压已固化为系统性的权衡机制,调节服务与供给服务、文化服务之间的空间竞争尤为明显。

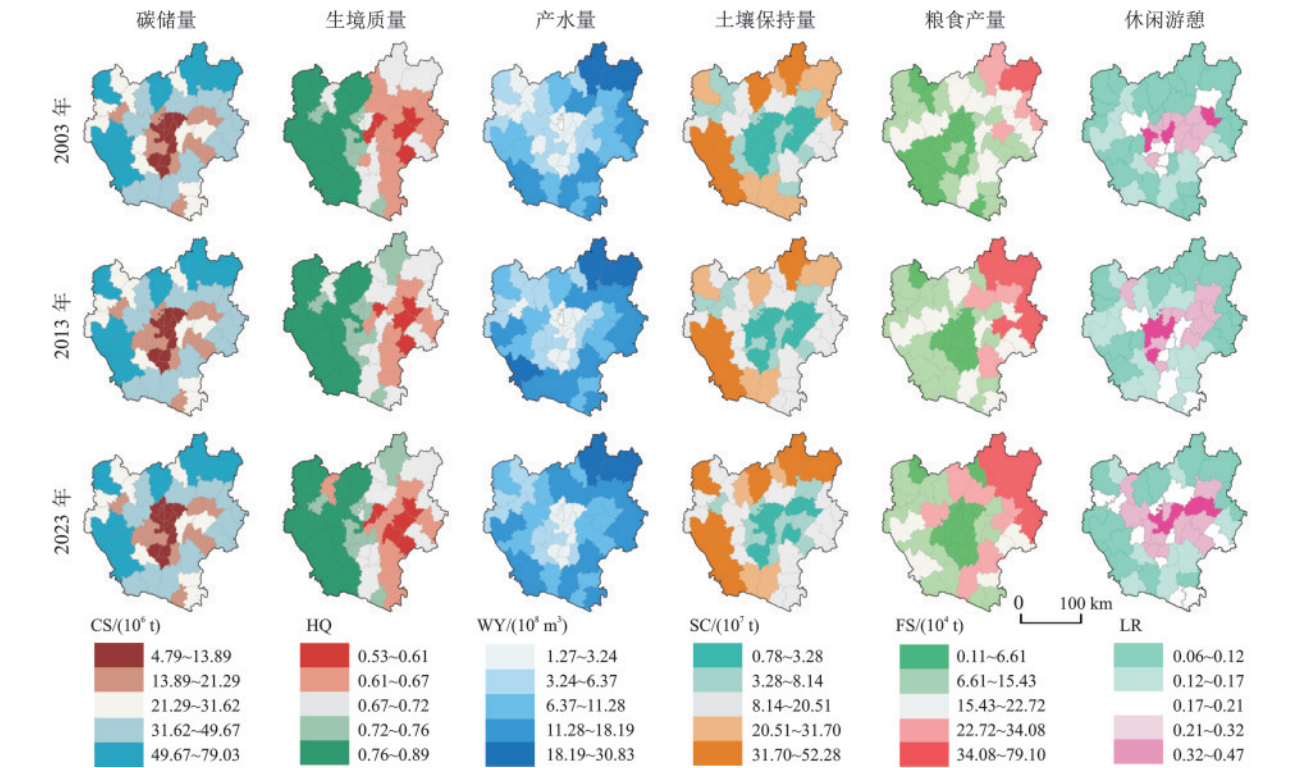
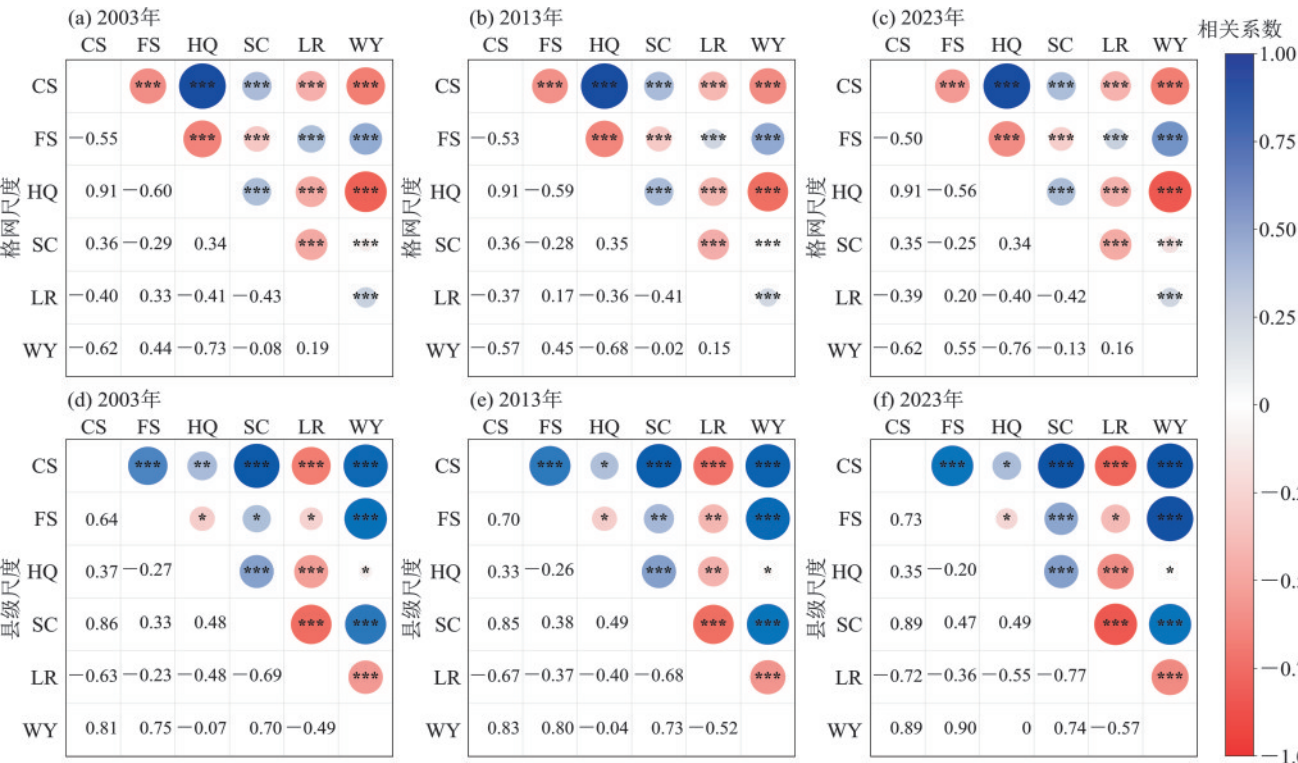


图 3 2003—2023 年滇中城市群各项生态系统服务县级尺度空间格局

Fig.3 Spatial patterns of ecosystem services at county scale in central Yunnan urban agglomeration (2003—2023)



注: *表示 $0.01 < p < 0.05$; **表示 $0.001 < p < 0.01$; ***表示 $p < 0.001$ 。

图 4 滇中城市群格网与县级尺度下各生态系统服务间的皮尔逊相关性矩阵

Fig.4 Pearson correlation matrix between ecosystem services at grid and county scales in central Yunnan urban agglomeration

2.2.2 权衡与协同关系的空间集聚格局 双变量空间自相关分析揭示 2003—2023 年滇中城市群格网与县级尺度 6 项生态系统服务权衡协同格局的时空演化特征(图 5~图 7)。格网尺度下,FS、HQ、WY、SC、

LR 与 CS 6 项服务间的空间关联格局总体呈现的态势为:以滇池、抚仙湖及主要水系沿岸为核心的低-低集聚持续向外扩张,东部与西南部的高-高、高-低集聚局部收缩或迁移,西部低-高集聚则保持相对稳定。

具体而言,FS-CS、FS-HQ、FS-SC与HQ-CS等组合的低-低集聚沿水系周边不断强化扩展,在一定程度上反映高强度人居活动与建设用地扩张对河湖周边多元生态空间的持续性负面胁迫;FS-WY、HQ-WY与LR-WY的高-高集聚向东部转移或扩张,南部低-高集聚范围趋于缩减,可能与区域降水格局的空间变动及水热本底的重新分配存在一定关联;FS-LR、HQ-LR与SC-LR的高-高集聚呈破碎斑块状且逐步衰减,低-高集聚呈连片扩张态势,表明游憩基础设施建设与城镇空间扩张在显著提升局部LR功能的同时,对周边的农业生产与生态本底造成一定的破碎化冲击;其余组合如HQ-SC、SC-CS等空间关联类型变化不显著。综合来看,格网尺度分析进一步表明,在城镇化与水域分布共同驱动下,中部低值协同区持续固化,边缘高值协同区动态调整,构成区域空间重组的基本规律。

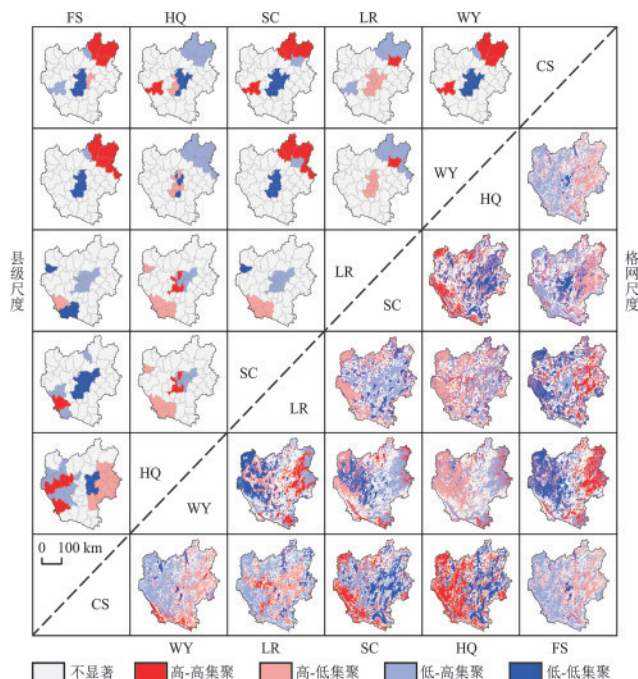


图 5 2003 年滇中城市群生态系统服务权衡与协同空间格局
Fig.5 Spatial patterns of ecosystem service trade-offs and synergies in central Yunnan urban agglomeration in 2003

县级尺度各服务组合的空间关联呈显著异质性与阶段性稳定特征。FS-CS、FS-WY及WY-CS的高-高集聚始终锁定在东北部的会泽、宣威、沾益等区县,表明这些区域相对稳定的农业生产本底,有效发挥生态屏障的定位功效;FS-HQ、HQ-SC和SC-CS在中部五华、盘龙、官渡、呈贡、红塔、江川等核心城区形成持续低-低集聚带,反映出高密度城市核心区由于不透水面长期蔓延及高强度干扰,生态服务功能呈现出结构性的“塌陷”状态。高-低与低-高集聚类型多分布于中部与边缘过渡地带,随时间呈收缩或转换趋

势,如FS-LR中宜良、嵩明由高-高集聚转化为低-低或低-高集聚;HQ-WY与SC-WY西南部的高值集聚至2023年趋于不显著,可能与局部喀斯特石漠化土地利用转型的阶段性变化及生态修复工程的响应差异有关。整体格局反映出城市化进程中中部低值服务塌陷区长期固化、东北部协同高值区保持稳定、西南与南部边缘类型动态调整的阶段性演化特征。

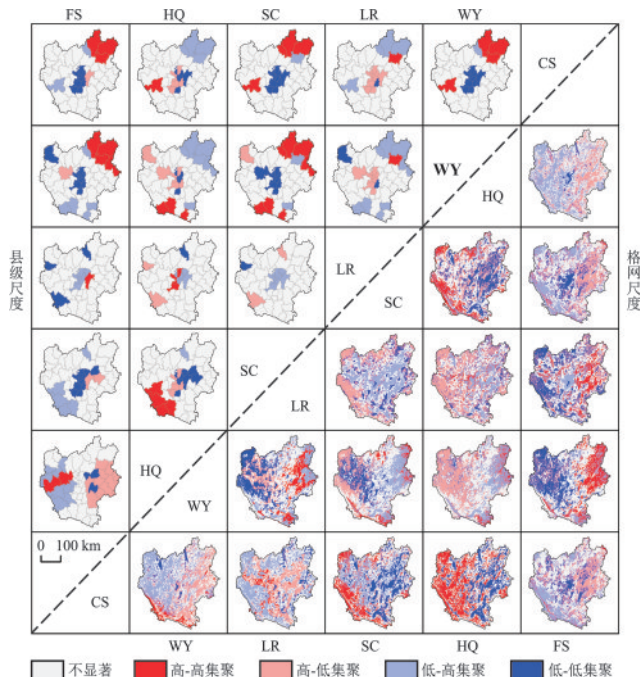


图 6 2013 年滇中城市群生态系统服务权衡与协同空间格局
Fig.6 Spatial patterns of ecosystem service trade-offs and synergies in central Yunnan urban agglomeration in 2013

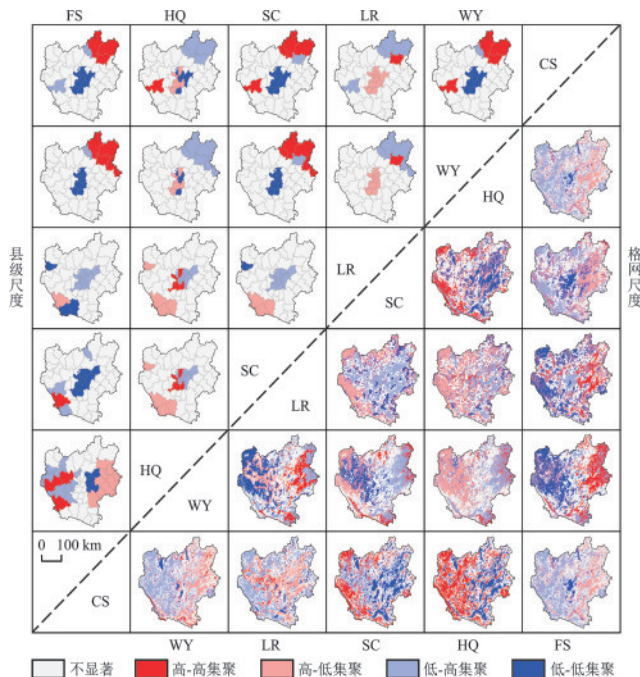


图 7 2023 年滇中城市群生态系统服务权衡与协同空间格局
Fig.7 Spatial patterns of ecosystem service trade-offs and synergies in central Yunnan urban agglomeration in 2023

2.3 基于 PPF-MRT 的非线性权衡强度与机制分析

鉴于 2023 年作为本研究时间序列的最新节点,其服务配置状态最能真实反映当前区域社会经济格局下的生态响应特征,且在数据完备性与政策实施效果评估方面最具代表性。该年份的分析结果能够准确刻画现阶段生态系统服务配置的边界潜力与转换代价,故将其作为典型年份,开展生产可能性边界与边际转换率(PPF-MRT)的精细化权衡分析。基于 PPF 的测算结果显示,2023 年格网尺度下各生态系统服务组合的 PPF 曲线拟合决定系数(R^2)均较高,表明三次多项式可有效刻画微观尺度上服务间的非线性边界约束关系(表 3、表 4)。

表 3 基于生产可能性边界的 2023 年格网尺度生态系统服务权衡分析结果汇总

Table 3 Summary of ecosystem service trade-offs at the grid scale based on production possibility frontier in 2023

权衡组合	帕累托点数	R^2	调整 R^2	p 值	TI(权衡强度)	过零点(X_0)
CS-FS	3	1.000 0	1.000 0	0.001 0	0.489 6	0.971 0
CS-LR	11	0.847 1	0.781 6	0.003 1	0.642 7	0.235 0
CS-WY	11	0.967 7	0.953 9	0	0.369 0	—
FS-HQ	2	1.000 0	1.000 0	0.001 0	0.431 7	—
FS-SC	6	0.722 9	0.307 1	0.385 4	0.780 2	0.963 0, 0.973 0
HQ-LR	6	0.927 7	0.819 1	0.106 5	0.700 7	—
HQ-WY	20	0.960 9	0.953 6	0	0.399 0	—
SC-LR	25	0.979 7	0.976 8	0	0.519 4	—
SC-WY	8	0.860 9	0.756 5	0.034 6	0.584 1	0.147 0

表 4 基于生产可能性边界的 2023 年县级尺度生态系统服务权衡分析结果

Table 4 Summary of ecosystem service trade-offs at the county scale based on production possibility frontier in 2023

权衡组合	帕累托点数	R^2	调整 R^2	p 值	TI(权衡强度)	过零点(X_0)
LR-CS	7	0.879 7	0.759 4	0.068 2	0.167 2	0.981 0
LR-FS	7	0.826 7	0.653 4	0.115 9	0.145 6	—
LR-SC	16	0.989 2	0.986 5	0	0.026 7	0.935 0
LR-WY	9	0.810 2	0.696 3	0.029 7	0.079 1	—
LR-HQ	8	0.994 1	0.989 7	0.000 1	0.311 1	—
FS-HQ	6	0.987 9	0.969 9	0.018 0	0.290 0	0.077 0, 0.832 0

2.3.1 格网尺度的微观边界与资源竞争 2023 年格网尺度 PPF-MRT 分析表明,微观空间单元内生态系统服务间存在剧烈的资源竞争,服务配置状态呈现显著的次优性与强烈的空间冲突特征(图 8)。格网尺度下,各服务组合权衡强度(TI)值普遍偏高(0.369 0~0.780 2)。其中,CS-WY(TI=0.369 0)与 HQ-WY(TI=0.399 0)的实际供给相对靠近帕累托最优边界,内部结构优化的弹性空间相对有限;而 FS-SC(TI=0.780 2)与 HQ-LR(TI=0.700 7)的前沿偏离度极高,现实配置呈显著次优状态,具有巨大的空间优化潜力。MRT 分析进一步揭示微观尺度下 2 类典型交互机制:其一,绝对权衡型,包括 CS-FS、CS-WY、FS-HQ、FS-SC、HQ-LR、HQ-WY 及 SC-LR,MRT 全域为负且无过零点,表明此类服务扩张以他项服务损耗为代价,边际机会成本持续非线性递增;其二,单阈值相变型,如 CS-LR(阈值 $X_0=0.235$)与 SC-WY(阈值 $X_0=0.147$),仅在越过低值供给临界点前呈现短暂协同增益,跨越阈值后即迅速相变反转,转入强烈的挤出性负向权衡。综上,格网微观空间管控亟须突破单一的线性资源开发思维,精确测算绝对权衡组合的空间机会成本,并锁定 CS-LR 等单阈值拐点,驱动高权衡冲突区向帕累托最优边界收敛以最大化局地综合效益。

2.3.2 县域尺度的宏观约束与相变特征 2023 年县级尺度 PPF-MRT 分析表明,空间数据尺度上推与聚合效应重塑生态系统服务间的冲突格局,服务配置状态呈现显著异质性分化(图 9)。县域尺度下,各服务组合权衡强度(TI)值跨度明显(0.026 7~0.311 1)。其中,LR-SC(TI=0.026 7)与 LR-WY(TI=0.079 1)的实际供给已极为贴近帕累托最优边界,内部结构优化的弹性空间有限;而涉及 HQ 的组合(LR-HQ 的 TI=0.311 1,FS-HQ 的 TI=0.290 0)前沿偏离度较高,现实配置呈显著次优状态,优化潜力较大。MRT 分析进一步揭示宏观尺度下 3 类典型交互机制:其一,绝对权衡型,包括 LR-FS、LR-WY、LR-HQ,MRT 全域为负且无过零点,表明此类服务扩张以他项服务损耗为代价,边际机会成本持续递增;其二,单阈值相变型,如 LR-CS(阈值 $X_0=0.981$)与 LR-SC(阈值 $X_0=0.935$),仅在逼近供给极限的高值区发生关系反转;其三,区间权衡型,以 FS-HQ 为代表,呈现严格的双阈值约束:该组合在粮食供给的主体规模区间($0.077<X<0.832$)内表现为稳定的负向权衡,仅在极低或极高供给水平的区间两端才呈现短暂的协同增益。综上,县域宏观空间规划须规避单一服务的极端化开发与保护,充分权衡资源置换的潜在代价,并依托 FS-HQ 等双阈值协同区间将关键服务调控在合理限度内,以实现区域功能整体最优配置。

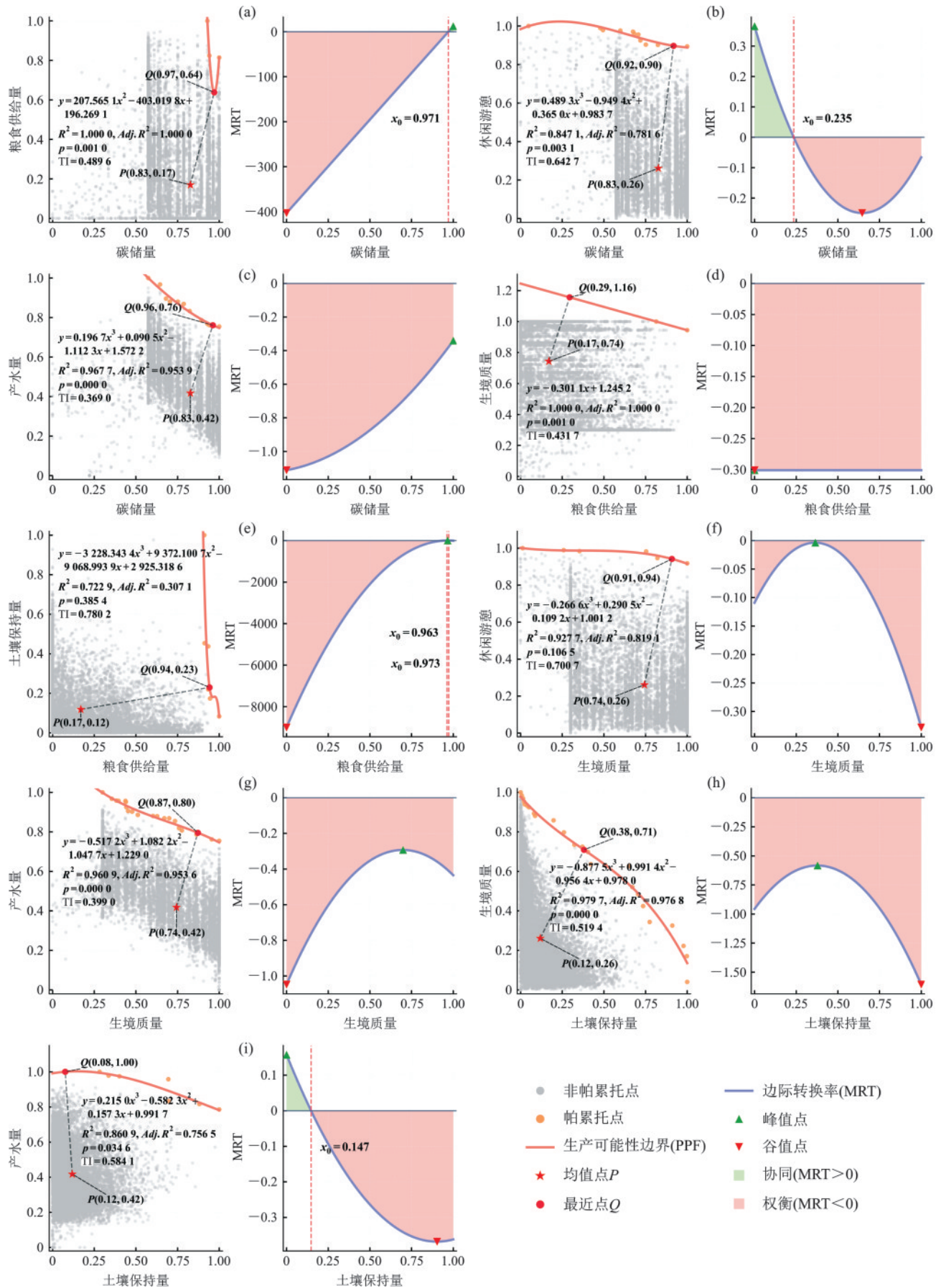


图 8 2023年滇中城市群网格尺度生态系统服务权衡与协同的 PPF 及 MRT 曲线

Fig.8 PPF and MRT curves of ecosystem service trade-offs and synergies at grid scale in central Yunnan urban agglomeration in 2023

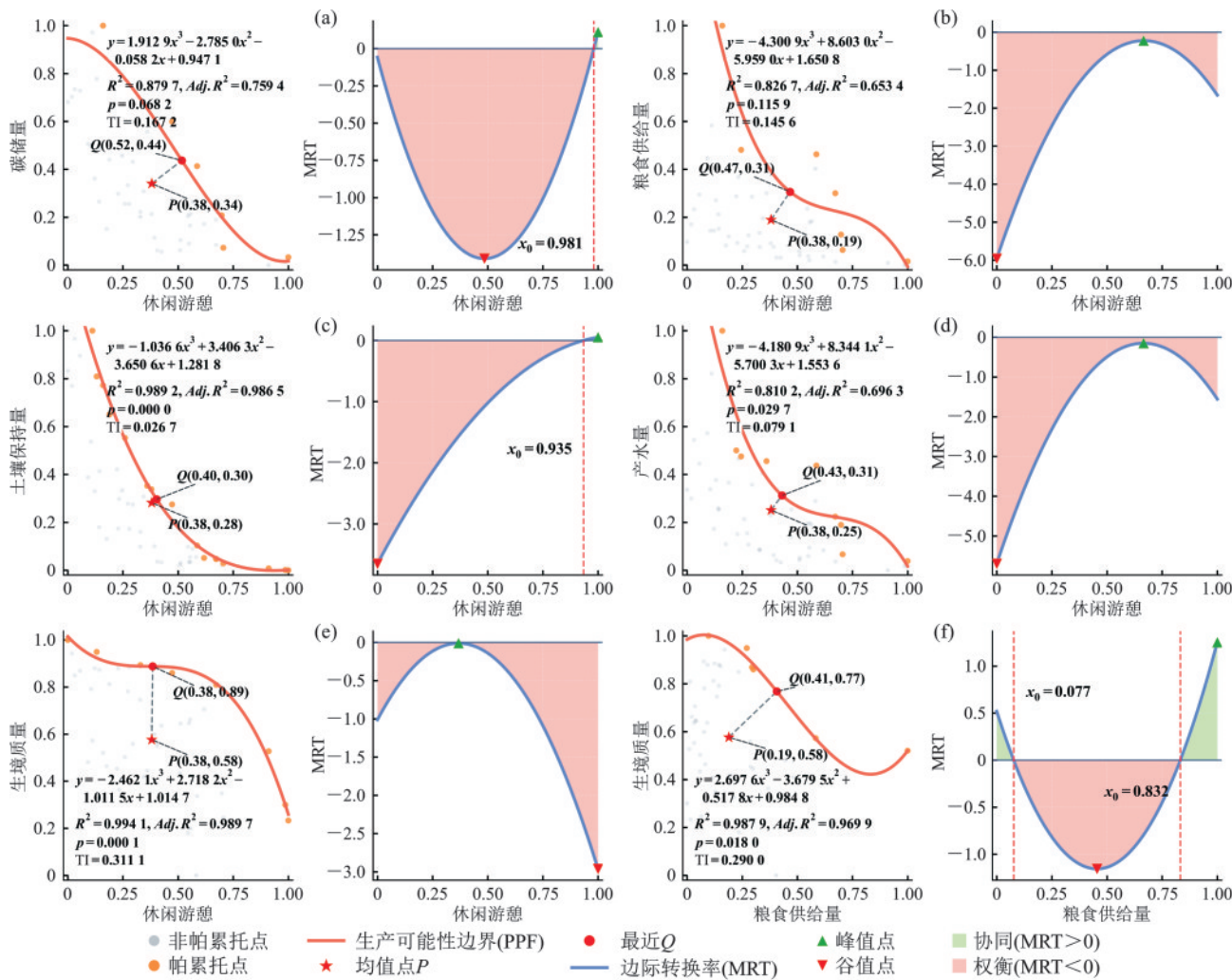


图 9 2023 年滇中城市群县级尺度生态系统服务权衡与协同的 PPF 及 MRT 曲线

Fig.9 PPF and MRT curves of ecosystem service trade-offs and synergies at county scale in central Yunnan urban agglomeration in 2023

3 讨论

3.1 生态系统服务权衡识别的尺度效应

生态系统服务的权衡与协同关系具有显著的空间尺度依赖性。本研究表明,评价尺度的上推深刻改变滇中城市群 ES 权衡关系的性质、强度及演变轨迹,此发现与黄土高原等多尺度研究^[3]的结论相符。在微观格网尺度下,生态系统服务表现为激烈的空间冲突与高强度的资源竞争。PPF-MRT 结果显示,CS-FS、FS-HQ 等多对服务组合呈严格的绝对权衡型,权衡强度 TI 普遍处于 0.369 0~0.780 2 的高位区间。究其原因,在于微观像元内土地利用具有非此即彼的物理排他性,如农业垦殖直接挤占生态空间,从而诱发强烈的底层资源约束^[24]。更为关键的是,格网尺度能够精准识别生态服务转换的非线性阈值:CS-LR($X_0=0.235$)与 SC-WY($X_0=0.147$)在跨越临界点后均由协同转入强权衡。从生态学底层机理分析,适度植被恢复在初期可固土保肥,但当植被密度跨越阈值后,植物冠层截留与深根系蒸腾的累

积效应将剧烈消耗水分,导致产水量急剧下降^[25],触发 SC 与 WY 之间的尖锐冲突。同样,过度游憩开发若跨越阈值,人为干扰将对植被碳汇功能造成不可逆破坏,使微观层面生态效益出现断崖式降级。

当尺度上推至县域时,局部异质性被有效平滑,空间结构的缓冲能力显著增强。县域作为宏观行政与管理单元,内部包含林地、耕地、水域与建设用地的复合镶嵌结构,这种宏观景观的斑块交错格局有效稀释微观地块间的绝对物理排斥^[26]。本研究发现,县域尺度下多项服务的权衡强度 TI 明显降低,范围降至 0.026 7~0.311 1。但在尺度重构过程中,FS-HQ 演化为具有严格双阈值约束的区间权衡型。此结果表明,尽管宏观功能分区能够在一定程度上稀释微观冲突,但在粮食生产的主体规模区间内,农业产出扩张与生境保育之间的竞争关系依然稳固,二者的协同增益仅在供给水平的极端情景下方可达成。上述规律与黄土高原^[3]及江西省^[27]生态系统服务权衡研究的尺度效应演变特征高度契合。

3.2 基于多尺度权衡的分区调控与政策启示

本研究揭示的非线性权衡特征,可为滇中城市群落实“三区三线”管控及《滇中城市群国土空间专项规划(2023—2035)》提供精准量化依据。鉴于不同尺度权衡机制存在差异,调控策略的制定应植根于多尺度嵌套的国土空间分区管治框架。格网微观层面,须强化“三线”的刚性约束与退化修复力度。针对滇池、抚仙湖等人类活动扰动强烈、服务功能冲突尖锐的格网单元,需严格落实生态保护红线的负面准入清单^[19]。本研究测算所得的相变拐点应作为开发强度控制的刚性依据:在城镇开发边界内的地块用途管制中,应将相变阈值作为管控红线^[4],严防高价值生态空间遭受侵占与退化。对于权衡强度TI值偏高、显著偏离帕累托最优边界的区域,如FS-SC冲突剧烈的坡耕地活跃区,以及元谋、武定、师宗等水土流失或石漠化问题突出、服务配置失当的格网,应优先部署专项规划所明确的生态屏障建设与石漠化综合治理重点工程^[28],通过精准修复降低内部要素的边际转换成本,推动受损地块向帕累托最优边界收敛^[15],实现微观空间单元内生态功能与社会经济产出的最优平衡。

县域宏观层面,则应充分发挥空间结构的缓冲能力,优化“三区”功能布局。针对宣威、会泽、永仁等生态空间与农业空间交织区域,政策设计宜顺应服务间的区间协同特征,规避单一功能开发的极端化倾向。在划定永久基本农田与生态保护红线时,需参照本研究测得的协同阈值区间 $0.077 < X < 0.832$,将粮食生产规模约束在系统承载力安全边界之内,以促成农业生产与水源涵养、生境保育等功能的结构性平衡。对于五华、呈贡等城镇高度集约空间,应结合专项规划所确立的中心集聚与轴向带动导向,在保障休闲游憩服务供给的同时,借助城市蓝绿交织网络与生态廊道建设,遏制建设用地过度扩张对生境质量的挤压。通过构建“宏观县域定区间限额—微观格网严阈值准入”的嵌套治理模式,可有效统筹滇中城市群的底线约束与功能协同。

3.3 研究局限性与未来展望

本研究基于PPF-MRT模型量化了滇中城市群生态系统服务的非线性权衡特征及尺度效应,但仍存在2个方面的局限:其一,权衡关系尺度演化的驱动机制尚未深入解析。自然本底与人类活动的交互作用及其尺度非平稳性,有待借助多尺度地理加权回归、可解释机器学习等空间计量方法加以定量识别与探索。其二,未开展连续时间序列与未来多情景演变模拟。当前节点式分析虽能揭示10 a尺度的

波动特征,却难以捕捉短期剧烈变动与连续演变过程,后续需依托高频遥感数据构建长时序动态监测,并耦合PLUS等土地利用模拟模型,预测自然发展、严格保护、城镇扩张等多重情景下的权衡演变态势,为区域中长期生态安全格局优化提供前瞻性支撑。

4 结论

1)滇中城市群生态系统服务呈整体增长、局部波动、功能分区的时空演变特征。2003—2023年,WY、SC、FS与LR持续显著增长,总增幅均逾20%,FS呈现前期快速攀升、后期高位稳定的特征;CS与HQ则呈先降后升的变化态势。空间分布上,CS与HQ维持西高东低格局,WY与SC高值区高度叠合于西南部与东北部山区。县域尺度下,外围屏障区如会泽、宣威以生态调节与粮食生产功能为主,核心城镇区如五华、呈贡则以文化服务功能突出,二者形成空间互补格局。

2)生态系统服务权衡强度随尺度上推显著衰减,呈现明显的尺度依赖效应与性质相变。由格网尺度向县域尺度转换过程中,权衡强度(TI)大幅下降。格网尺度下受土地利用物理排他性制约,多对服务表现为绝对权衡,TI值处于0.369 0~0.780 2的较高区间;县域尺度则因空间结构缓冲效应,TI值降至0.026 7~0.311 1。上述尺度效应在一定程度上促使ES交互机制由微观剧烈资源竞争向宏观结构性功能协同转化,但权衡关系并未因尺度上推而根本消解。

3)多级空间尺度与非线性相变共同塑造了滇中城市群生态系统服务的复杂交互格局。微观格网尺度上具有显著的突变效应,如CS-LR和SC-WY分别在跨越0.235和0.147的临界点后由协同逆转为强权衡;宏观县域尺度则表现为结构性的区间约束,如FS-HQ在0.077~0.832的主体区间内持续呈现稳固的负向竞争。因此,石漠化区空间管控应立足多尺度阈值,实施宏观控区间与微观守底线的嵌套策略,以优化综合生态效益。

参考文献:

- [1] 廖祥,杨鑫,郭社平,等.生态系统服务与人类福祉的交互作用及其驱动因素:以成渝城市群为例[J].环境科学,2025,46(11):7298-7315.
- Liao Xiang, Yang Xin, Guo Sheping, et al. Interactive effects of ecosystem services and human well-being and their driving factors: A case study of the Chengdu-Chongqing urban agglomeration [J]. Environmental Science, 2025, 46(11): 7298-7315.
- [2] 张碧天,闵庆文,焦雯珺,等.生态系统服务权衡研究进展[J].生态学报,2021,41(14):5517-5532.

- Zhang Bitian, Min Qingwen, Jiao Wenjun, et al. Research progress and perspective on ecosystem services trade-offs [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(14): 5517-5532.
- [3] 赵雪雁, 丁静, 马平易. 人类活动对黄土高原生态系统服务权衡/协同关系影响的多尺度研究[J]. *地理学报*, 2025, 80(7): 1920-1936.
- Zhao Xueyan, Ding Jing, Ma Pingyi. Multi-scale study of the impact of human activities on the trade-off/synergy relationship of ecosystem services in the Loess Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2025, 80(7): 1920-1936.
- [4] 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 Qiang, Zhao Wenwu, Wang Jing, 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.
- [5] Zuo Lingli, Liu Guohua, Zhao Junyan, et al. Spatiotemporal heterogeneity management: Optimizing the critical role of ecosystem services in achieving sustainable development goals [J]. *Geography and Sustainability*, 2025, 6(1): e100211.
- [6] 黄强, 陈田田, 王强, 等. 喀斯特山区生态系统服务权衡关系分异特征及生态安全格局识别: 以贵州省为例[J]. *地理科学*, 2024, 44(6): 1080-1091.
- Huang Qiang, Chen Tiantian, Wang Qiang, et al. Differentiation characteristics of trade-off on ecosystem services and identification of ecological security pattern in karst mountainous areas: A case study of Guizhou Province [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2024, 44(6): 1080-1091.
- [7] 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 Jieyi, Zhang Jinhe, Dong Ping, 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.
- [8] 马月伟, 潘健峰, 蔡思青, 等. 生态系统服务社会价值与生态价值的权衡与协同关系: 以普达措国家公园为例[J]. *地理科学*, 2022, 42(7): 1283-1294.
- Ma Yuewei, Pan Jianfeng, Cai Siqing, et al. Trade-offs and synergies between social value and ecological value of ecosystem services: A case study of the potatso National Park [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, 42(7): 1283-1294.
- [9] 邓钰妆, 陈国坤, 黄燕, 等. 洱海流域水源涵养与土壤保持功能时空演变及权衡协同关系[J]. *水土保持学报*, 2026, 40(1): 438-450.
- Deng Yuzhuang, Chen Guokun, Huang Yan, et al. Spatiotemporal evolution of trade-off and synergy relationship between water conservation and soil retention functions in Erhai Lake basin [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2026, 40(1): 438-450.
- [10] 施荟文, 田雅丝, 陈家乐, 等. 城市及周边土地利用时空演变及其对生态系统服务权衡协同的影响机制: 以苏州市为例[J]. *生态学报*, 2025, 45(15): 7386-7400.
- Shi Huiwen, Tian Yasi, Chen Jiale, et al. On the trade-offs and synergy relationship of ecosystem services, taking into account the territorial spatial structure of urban-marginal-rural areas: A case study of Suzhou City [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(15): 7386-7400.
- [11] 郭荣中, 申海建, 张阔, 等. 长株潭城市群生态系统服务变化及其权衡协同研究[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(4): 365-374.
- Guo Rongzhong, Shen Haijian, Zhang Kuo, et al. Ecosystem services and their trade-offs and synergies in Chang-Zhu-Tan urban agglomeration [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(4): 365-374.
- [12] 段宝玲, 冯强, 王晶, 等. 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[J]. *环境科学研究*, 2026, 39(3): 712-726.
- Duan Baoling, Feng Qiang, Wang Jing, et al. Type identification, relationship network, and driving mechanisms of ecosystem service trade-offs in the Xinshui River basin, middle reaches of the Yellow River [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2026, 39(3): 712-726.
- [13] 黄纪星, 刘婉仪, 杨舒棋, 等. 将生态系统服务纳入耕地多功能的权衡协同评估和分区管理[J]. *生态环境学报*, 2026, 35(1): 40-53.
- Huang Jixing, Liu Wanyi, Yang Shuqi, et al. Temporal and spatial trade-offs between the production, livelihood, and ecological functions of cultivated land from the perspective of ecosystem services [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2026, 35(1): 40-53.
- [14] 李明月, 方萌杰, 周艺霖. 洞庭湖生态经济区多情景生态系统服务权衡/协同关系及功能分区研究[J]. *地理科学*, 2026, 46(4): 956-970.
- Li Mingyue, Fang Mengjie, Zhou Yilin. Multi-scenario trade-offs/synergies and functional zoning of ecosystem services in the Dongting Lake Ecological Economic Zone [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2026, 46(4): 956-970.
- [15] Peng Jian, Wang Xiaoyu, Zheng Huining, et al. Applying production-possibility frontier based ecosystem services trade-off to identify optimal scenarios of Grain-for-Green Program [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2024, 242: e104956.
- [16] 朱加应, 彭双云. 近30年来滇中城市群生态用地变化轨迹时空演变特征及其驱动机制[J]. *水土保持学报*,

- 2024,38(1):278-288.
- Zhu Jiaying, Peng Shuangyun. Spatial-temporal characteristics and driving mechanism of ecological land change trajectories in central Yunnan urban agglomeration in recent 30 years[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(1):278-288.
- [17] 中华人民共和国水利部. 2025年中国水土保持公报[EB/OL]. [2026-04-02]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/202602/t20260211_2101541.html.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. 2025 bulletin of soil and water conservation in China[EB/OL]. [2026-04-02]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/202602/t20260211_2101541.html.
- [18] 李琛, 吴映梅, 高彬媛, 等. 滇中城市群城镇化水平与生态系统健康的近远程耦合协调[J]. 经济地理, 2025, 45(4):157-167.
Li Chen, Wu Yingmei, Gao Binpin, et al. Local and tele-coupling coordination of urbanization and ecosystem health in the central Yunnan urban agglomeration[J]. Economic Geography, 2025, 45(4):157-167.
- [19] 周昌焰, 黄艳春, 马月伟, 等. 滇中城市群生态系统服务对影响因子的非线性响应及生态治理分区[J/OL]. 环境科学, 2026. doi:10.13227/j.hjlx.202509212.
Zhou Changyan, Huang Yanchun, Ma Yuewei, et al. Nonlinear responses of ecosystem services to driving factors and ecological governance zoning in the Central Yunnan urban agglomeration[J/OL]. Environmental Science, 2026. doi: 10.13227/j.hjlx.202509212.
- [20] 彭双云, 陈明潇, 张老伟, 等. 滇中城市群碳储量时空演变及其对LULC变化的响应[J]. 水土保持学报, 2024, 38(4):246-256.
Peng Shuangyun, Chen Mingxiao, Zhang Laowei, et al. Spatiotemporal evolution of carbon storage in the central Yunnan urban agglomeration and its response to LULC change[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4):246-256.
- [21] 虞涵, 吴映梅, 李琛, 等. 滇中高原山地城市群土地利用及生境质量的时空演变与多情景模拟[J]. 应用生态学报, 2024, 35(10):2842-2852.
Yu Han, Wu Yingmei, Li Chen, et al. Spatial and temporal evolution and multi-scenario modeling of land use and habitat quality in highland mountainous urban agglomeration of central Yunnan, Southwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(10):2842-2852.
- [22] 王卓尧, 任宇飞, 姜群鸥, 等. 基于InVEST模型云南省生态系统服务功能综合评估[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(11):103-112.
Wang Zhuoyao, Ren Yufei, Jiang Qunou, et al. Comprehensive evaluation of ecosystem service functions in Yunnan Province of southwestern China based on InVEST model[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(11):103-112.
- [23] 钟敬秋, 彭帅, 高梦凡, 等. 生态系统文化服务流空间多尺度研究:以辽河口国家公园为例[J]. 地理科学进展, 2024, 43(11):2226-2241.
Zhong Jingqiu, Peng Shuai, Gao Mengfan, et al. A multi-scale study on the spatial flow of cultural ecosystem services: A case study of Liaohekou National Park [J]. Progress in Geography, 2024, 43(11):2226-2241.
- [24] 吴朝巧, 余晓成, 宁彧杰, 等. 太原市多尺度生态系统服务权衡/协同关系及生态功能分区[J]. 环境科学, 2025, 46(11):7234-7245.
Wu Chaoqiao, Yu Xiaocheng, Ning Yujie, et al. Multi-scale ecosystem services trade-off/synergy and ecological function zoning in Taiyuan City [J]. Environmental Science, 2025, 46(11):7234-7245.
- [25] Ma Shuai, Wang Liangjie, Ye Limin, et al. Vegetation restoration thresholds under different vegetation types and altitude gradients in the Sichuan-Yunnan ecological shelter, China [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 340:e117910.
- [26] Wang Liangjie, Gong Jianwen, Ma Shuai, et al. Ecosystem service supply-demand and socioecological drivers at different spatial scales in Zhejiang Province, China [J]. Ecological Indicators, 2022, 140:e109058.
- [27] 章双双, 李少坤, 李明, 等. 多尺度下江西省主体功能区生态系统调节服务权衡协同及驱动因素[J]. 水生生态学杂志, 2025, 47(5):143-156.
Zhang Shuangshuang, Li Shaokun, Li Ming, et al. Trade-offs, synergies, and driving factors of regulating ecosystem services in the main function zones of Jiangxi Province at multiple scales [J]. Journal of Hydroecology, 2025, 47(5):143-156.
- [28] 赵丽娜, 李瑞, 袁江, 等. 喀斯特流域径流侵蚀力的时空分异及其对岩溶特征因子的响应[J]. 水土保持学报, 2024, 38(1):60-69.
Zhao Lina, Li Rui, Yuan Jiang, et al. Spatial-temporal variation of runoff erosivity in karst basin and its response to karst characteristic factors [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1):60-69.