基于生态系统服务簇演变的桂林市中心城区生态功能分区与优化*

陈 欣[1] 杨建辉[2] 任海涛[3] 叶博雅[1]

(1. 西安建筑科技大学未来技术学院，西安 710055；2. 西安建筑科技大学建筑学院，西安 710055；3. 西安建筑科技大学艺术学院，西安 710055)

摘要：【目的】针对喀斯特生态脆弱区城市化扩张与生态保护之间的矛盾，开展基于生态系统服务簇演变的生态功能分区与优化策略研究，旨在揭示生态系统服务权衡-协同关系的时空分异规律及驱动机制，并将生态过程认知转化为可操作的空间管控方案。【方法】以桂林市中心城区为例，提取 2013、2018 和 2023 年网格点数据，通过地理加权回归、冗余分析等方法量化生态系统服务空间格局，揭示其权衡协同的驱动机制，基于服务簇识别构建生态功能分区。【结果】1）2013—2023 年，桂林市中心城区碳储量先降后升、高值区向西南扩展，生境质量波动变化，土壤保持量持续衰减、高值区收缩，城市降温高值区稳步扩大，雨洪调蓄量整体稳定。2）5 项生态系统服务之间的权衡/协同关系呈现“西南部协同-中东部权衡”的稳定空间分异。3）NDVI 与社会经济因子共同驱动上述分异，形成西南部自然生态主导、中东部人文活动主导的对比格局。4）近 10 年，研究区碳汇与生境保育功能协同增强，土壤保持功能持续衰退，雨洪调节功能此消彼长，低效城市功能区剧烈退化并持续扩张。【结论】生态系统服务权衡-协同关系受自然本底与人类活动梯度耦合控制，表现为“西南生态盈余-中东部生态赤字”的空间分异规律；基于服务簇的 6 类生态功能区可为差异化空间管控提供直接靶向；构建的服务评估-关系解析-簇群识别-分区管控框架，为城市生态评估向治理实践转化提供了方法论借鉴。

关键词：城市生态系统服务；生态功能分区；权衡协同；冗余分析

DOI：10.12169/zgcsly.2025.12.19.0002

Ecological Functional Zoning and Optimization in the Central Urban Area of Guilin Based on the Evolution of Ecosystem Service Bundles

Chen Xin[1] Yang Jianhui[2] Ren Haitao[3] Ye Boya[1]

(1. College of Future Technology, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. College of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. College of Arts, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: 【Objective】 In response to the conflict between urban expansion and ecological conservation in ecologically fragile karst regions, this study developed an ecological functional zoning and optimization framework based on the evolution of ecosystem service bundles. The objectives were to reveal the spatiotemporal patterns and driving mechanisms of ecosystem service trade-offs and synergies, and to translate ecological process understanding into operational spatial management strategies. 【Method】 Focusing on the central urban area of Guilin, this study extracted grid-based data for 2013, 2018, and

收稿日期：2025-12-19

* 基金项目：国家重点研发计划课题（2022YFC3802603）

第一作者：陈欣，女，2000 年生，硕士生，研究方向为人居环境生态学。E-mail：cx082838@163.com

通信作者：杨建辉，男，1977 年生，博士，教授，风景园林系主任，研究方向为西部城镇绿色空间规划设计理论与方法、西部城市雨洪管理规划设计方法与工程技术。E-mail：297011785@qq.com

2023. Geographically weighted regression and redundancy analysis were applied to characterize the spatial patterns of ecosystem services and to identify the mechanisms driving their trade-off and synergistic relationships. Ecological functional zones were subsequently delineated based on ecosystem service bundle identification.【Result】1) From 2013 to 2023, carbon storage in the central urban area of Guilin first decreased and then increased, with high-value areas expanding toward the southwest. Habitat quality showed fluctuating changes, soil retention continued to decline with shrinking high-value areas, high-value areas of urban cooling steadily expanded, and stormwater regulation remained generally stable. 2) The trade-off/synergy relationships among the five ecosystem services showed a stable spatial differentiation pattern characterized by "synergies in the southwest and trade-offs in the central and eastern areas." 3) This spatial differentiation was jointly driven by NDVI and socio-economic factors, forming a contrasting pattern dominated by natural ecological processes in the southwest and human activities in the central and eastern areas. 4) Over the past decade, the synergy between carbon sequestration and habitat conservation functions has strengthened, soil retention has continuously declined, stormwater regulation has shown spatially offsetting changes, and low-efficiency urban functional zones have degraded sharply and continued to expand.【Conclusion】Ecosystem service trade-offs and synergies are jointly shaped by natural conditions and human activities, forming a spatial pattern of "ecological surplus in the southwest and ecological deficit in the central and eastern areas." The six functional zones identified from ecosystem service bundles provide practical targets for differentiated spatial management and support the translation of ecological assessment into urban planning practice.

Keywords: urban ecosystem services; ecological functional zoning; trade-offs and synergies; redundancy analysis

快速城市化在驱动社会经济发展的同时，也给区域生态系统安全带来巨大压力，直接威胁着生态系统服务的可持续供给[1]。景观生态学的研究范式已从“格局-过程-尺度”（PPS）演进为新兴的“格局-过程-服务-可持续性”（PPSS）框架[2]，强调揭示空间格局与生态过程的耦合机制，明晰生态系统服务（ES）之间的复杂关系。在此范式下，生态功能分区作为落实空间管控的核心手段，其科学内核正从传统的“要素叠加”向“过程-关系”导向转变。早期分区多依赖气候、地形、植被等静态环境要素[3]，当前则更注重以关键生态过程及其服务间权衡协同关系作为依据[4]。然而，如何有效整合生态系统服务权衡协同的动态规律与驱动机制，并转化为可操作的生态空间管控方案，仍是需要深入研究的科学问题。

尽管当前生态系统服务的量化、关系识别及驱动机制研究已取得显著进展[5]，但其动态规律向管控方案转化的路径仍不清晰。现有研究多借助地理探测器[6]、随机森林分析[7]、结构方程模型[8]及贝叶斯网络[9]等统计模型解释权衡协同关系的成因，却未能基于量化后的驱动因子分析结果进一步指导管控边界的划定与管控等级的分级，导致理论结果与实践脱节。此外，传统静态分区难以匹配生态系统服务关系的动态演变特征[10]。大量实证表明，生态系统服务权衡协同关系具有明显的时空异质性，并随城市化进程而动态变化，分区静态性与关系动态性之间的矛盾日益凸显[11-12]。此外，现有研究多集中于宏观区域[13-14]，针对中心城区等精细化尺度的案例仍较缺乏，尤其在喀斯特等生态脆弱区，系统性地精准生态管理研究范本尚显不足。桂林作为世界级喀斯特地貌城市，其中心城区正面临高强度开发与脆弱生态保护的突出矛盾，亟待开展生态系统服务权衡协同关系及其空间管控转化的实证研究。

本研究以桂林市中心城区为例，遵循“格局-过程-服务-可持续性”研究范式，集成多时序高分辨率遥感影像与多源地理数据，解析生态系统服务空间格局，识别五项生态系统服务之间权衡协同关系的时空演变特征，并运用冗余分析揭示关键驱动机制；在此基础上，基于自组织映射网络识别生态系统服务簇，提出生态功能分区方案，进而制定差异化空间管控策略。针对喀斯特生态脆弱区城市化扩张与生态保护之间的矛盾，开展基于生态系统服务簇演变的生态功能分区与优化

策略研究，旨在揭示生态系统服务权衡-协同关系的时空分异规律及驱动机制，并将生态过程认知转化为可操作的空间管控方案。

1　研究区概况

桂林市中心城区位于广西壮族自治区东北部（109°59′—110°26′E，25°1′—25°25′N），总面积约 747.3 km^2。该区域属亚热带季风气候，温和湿润，年均气温 19 ℃，年均降水量 1 900 mm。地貌以山地和丘陵为主，整体呈西低东高趋势，海拔介于 122~894 m，西南部山区较高，中东部城区较低。土壤类型以石灰（岩）土为主，兼有水稻土、红色石灰土、红壤、砖红壤等。漓江等多条河流贯穿桂林市中心城区，植被类型多样，森林覆盖率较高，设有多个自然保护区与风景名胜区。

2　研究方法

2.1　数据来源

基础数据包括 2013、2018 和 2023 年的土地利用数据、高程数据、土壤数据、气象数据、植被指数数据、基础地理要素数据（表 1）。所有数据均基于 ArcGIS10.8 软件统一为投影坐标系 WGS_1984_UTM_Zone_49N 重采样为精度 2 m 的栅格数据。

表 1　数据来源

数据类型	分辨率	来源及数据说明
土地利用数据	2 m	获取 2013、2018 和 2023 年高分一号系列（高分一号 01 星、02 星、03 星）遥感影像进行解译
高程数据	30 m	地理空间数据云（https://www.gscloud.cn/）
土壤数据	30 m	中国科学院资源环境科学与数据中心（https://www.resdc.cn/）
气象数据	1 km	中国科学院资源环境科学与数据中心（https://www.resdc.cn/）
植被指数数据	30 m	地理空间数据云（https://www.gscloud.cn/）
基础地理要素数据	—	国家地理信息公共服务平台（https://www.tianditu.gov.cn/）

2.2　生态系统服务评估

为系统揭示桂林喀斯特地区高密度城市扩张对生态系统的影响，根据研究区的自然环境特征和数据可得性，选取雨洪调节、碳固存、生境质量、城市降温与土壤保持 5 种主要的生态系统服务功能进行评估。各项服务的量化指标及计算方法见表 2。

表 2　生态系统服务评价方法

生态系统服务类型	指标（单位）	公式	备注
碳固存[15-16]	总碳储量（$t \cdot hm^{-2}$）	$C_t = C_a + C_b + C_s + C_d$	C_t 为总碳储量（$t \cdot hm^{-2}$）；C_a、C_b 分别为地上、地下碳储量（$t \cdot hm^{-2}$）；C_s：土壤有机碳储量（$t \cdot hm^{-2}$）；C_d：死亡有机碳储量（$t \cdot hm^{-2}$）
生境质量[17-18]	生境质量指数（0~1）	$Q_{xj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^2}\right)\right]$	D_{xj} 为生境胁迫水平（无量纲，由威胁因子强度、权重及生境敏感度计算）；H_j 为生境适宜性（0~1）；k 为半饱和常数（取 0.5）；Q_{xj} 为 生境质量指数；z 为归一化常数（取 2.0）；下标 x 为栅格单元，j 为生境类型
城市降温[19-20]	热缓解指数（℃）	$HM_i = \sum_j g_i \cdot CC_j \cdot e\left(\frac{-d(i,j)}{d_c}\right)$	HM_i 为热缓解指数（℃）；g_i 为权重系数；CC_i：冷却能力指数（℃）；$d(i,j)$ 为到冷却源距离（m）；d_c 为冷却距离常数（m）
雨洪调节[20-21]	雨洪调蓄量（mm）	$Q_{ret} = P - \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$	Q_{ret} 为雨洪调蓄量（mm）；P 为暴雨设计深度（mm）；I_a 为初损量（mm），$Ia = 0.2S$；S 为最大滞蓄量（mm）
土壤保持[22-23]	土壤保持量（$t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$）	$SR = RKLS - USLE$ $RKLS = R \cdot K \cdot LS$ $USLE = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$	SR 为土壤保持量，RKLS 为潜在土壤侵蚀量，USLE 为实际土壤侵蚀量，单位均为 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$；$R$ 为降雨侵蚀力因子；K 为土壤可侵蚀因子；LS 为坡长坡度因子（无量纲）；P 为水土保持措施因子（0~1）；C 为植被覆盖因子（0~1）

2.3　Pearson 相关性分析

采用 Pearson 相关分析评估桂林市中心城区生态系统服务功能间的相关性[24]。经多尺度比较，选定 500 m×500 m 格网，提取 2013、2018 和 2023 年网格点数据，标准化后计算相关系数并绘制热图，以揭示服务间的协同与权衡关系。

2.4 地理加权回归

采用 R 语言 GWRmodel 工具包，对桂林市中心城区 2013、2018 和 2023 年生态系统服务数据进行地理加权回归。模型通过空间权重矩阵捕捉参数的空间非平稳特征，降低多重共线性[25]，清晰揭示服务间的空间权衡与协同关系，为生态管理提供科学依据。

2.5 生态系统服务簇识别

采用 R 语言的 kohonen 包进行自组织映射网络（SOM）分析[26]，识别生态系统服务空间聚类。SOM 通过竞争学习保持拓扑结构，兼具降维与聚类功能。经 2~10 聚类数测试，综合 Davies-Bouldin 指数与轮廓系数的肘部图拐点，确定最优聚类数为 6（十折交叉验证误差±1.8%），簇内同质性与簇间异质性良好，为后续空间分析提供了可靠基础。

2.6 冗余分析

冗余分析（RDA）是一种直接梯度分析方法，用于识别能够最大程度解释响应变量矩阵变异的一系列解释变量的线性组合[27]。结合自然环境与社会经济特征，选取夜间灯光指数（DMSP）、归一化植被指数（NDVI）、国内生产总值（GDP）、人口密度（POP）、净初级生产力（NPP）、气温（TEMP）、林地占比、草地占比、耕地占比共 9 个因子作为解释变量，通过冗余分析量化各解释变量对生态系统服务的影响。在 RDA 排序图中，响应变量与解释变量箭头之间的夹角反映两者的相关性：锐角表示正相关，且夹角越小正相关强度越大；钝角表示负相关，且夹角越大负相关强度越大；夹角接近 90°表示无显著相关性。此外，解释变量箭头的长度表征其对响应变量变异的解释程度，箭头越长，影响越大。本文使用 R 语言软件进行分析。

3 结果与分析

3.1 土地利用类型与生态系统服务的时空演变特征

2013—2023 年，研究区土地利用类型发生系统性转变，并同步体现于各项生态系统服务的时空分异中（图 1~2）。土地利用变化主要呈现两个过程：一是耕地向林地转换（63.10 km^2，2013—2018 年），集中于西南部；二是耕地向建设用地转换（累计 59.78 km^2），该过程主导了中东部的空间扩张。

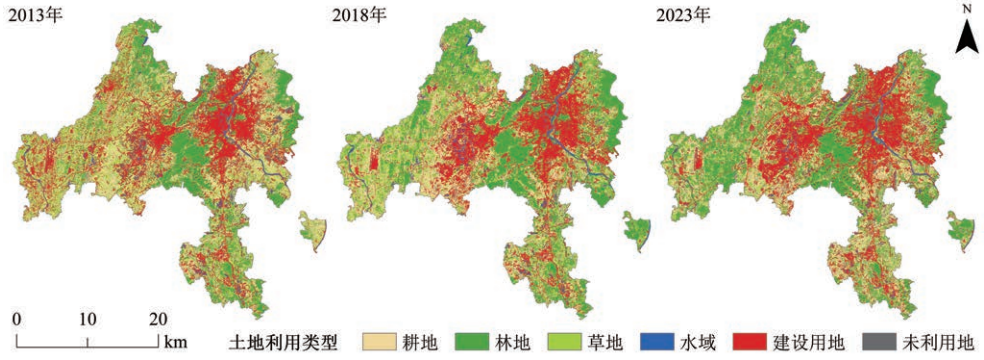
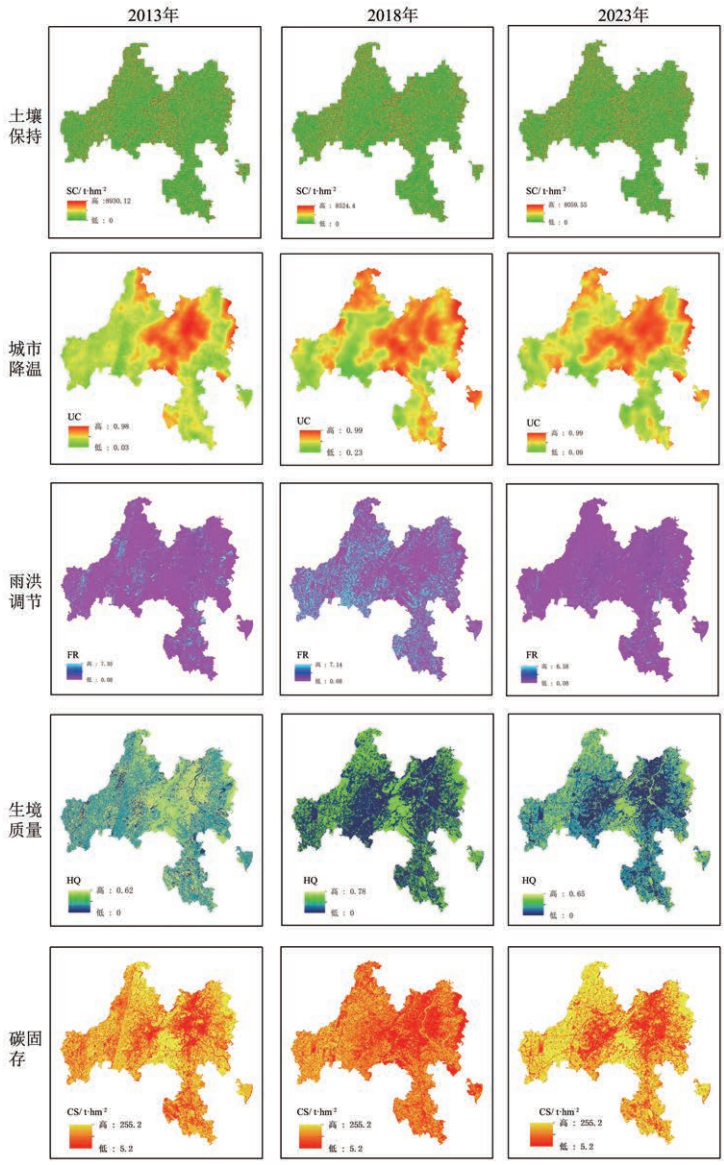


图 1 桂林市中心城区 2013—2023 年土地利用变化

各项生态系统服务呈现异质性的动态变化：总碳储量先降后升（2013 年：83.73 t · hm^{-2}；2018 年：67.62 t · hm^{-2}；2023 年：112.17 t · hm^{-2}），其高值区随着耕地向林地的转换而向西南部扩展；生境质量指数波动变化（2013 年：0.40；2018 年：0.54；2023 年：0.41），其高值区分布与林地空间格局及其转化区域相吻合；土壤保持量持续衰减（2013 年：8 930.12 t · hm^{-2} · a^{-1}；2023 年：8 059.55 t · hm^{-2} · a^{-1}），高值区范围收缩，且与建设用地扩张呈空间负相关；热缓解指数高值区稳步扩大，与城区内部及周边绿地分布密切相关；雨洪调蓄量高值区分布整体稳定，未发生显著变化。

3.2 生态系统服务间权衡协同关系的时空分异与动态演变

在 500 m×500 m 网格尺度下，2013—2023 年桂林市中心城区生态系统服务关系呈现显著时空异质性（P<0.001）。



注：SC 表示土壤保持；UC 表示城市降温；FR 表示雨洪调节；HQ 表示生境质量；CS 表示碳固存；下同。

图 2　桂林市中心城区 2013—2023 年生态系统服务空间分布格局

空间上，生态系统服务关系呈现明显的区域分异。西南部高海拔森林区因喀斯特峰丛结构完整、植被成熟，形成了稳定的土壤-植被-水文系统，碳固存、土壤保持、生境质量与城市降温等生态系统服务之间协同关系突出，反映了该区域生态系统结构完整、功能稳定。中东部低海拔城市化与农业密集区，受浅薄土壤和脆弱生态基底影响，人类活动导致不透水面面积增加、植被覆盖度下降，易引发水土流失与水文失调，普遍表现为服务间的权衡关系，尤其体现在城市降温与生境质量之间、雨洪调节与其他服务之间，这与不透水面面积扩张、植被减少及热岛效应增强密切相关（图 3）。

时间上，核心服务关系呈现阶段性变化。城市降温与碳汇的相关性在各研究年份均表现为显著正相关（$P<0.05$），表明碳汇对缓解热岛效应具有持续显著的作用，但可能存在边际效应。土壤保持与雨洪调节的关系呈动态转变：2013 年为不显著相关（$P>0.05$），2018 年转为显著负相关（$P<0.01$），至 2023 年恢复为不显著相关（$P>0.05$），反映城市化过程中土壤功能受损及后续修复对雨洪调节的动态影响。生境质量与碳汇的相关性各年均不显著（$P>0.05$），整体稳定，说明在喀斯特生境中，植被作为共同载体，其恢复与维持对服务供给具有基础作用（图 4）。

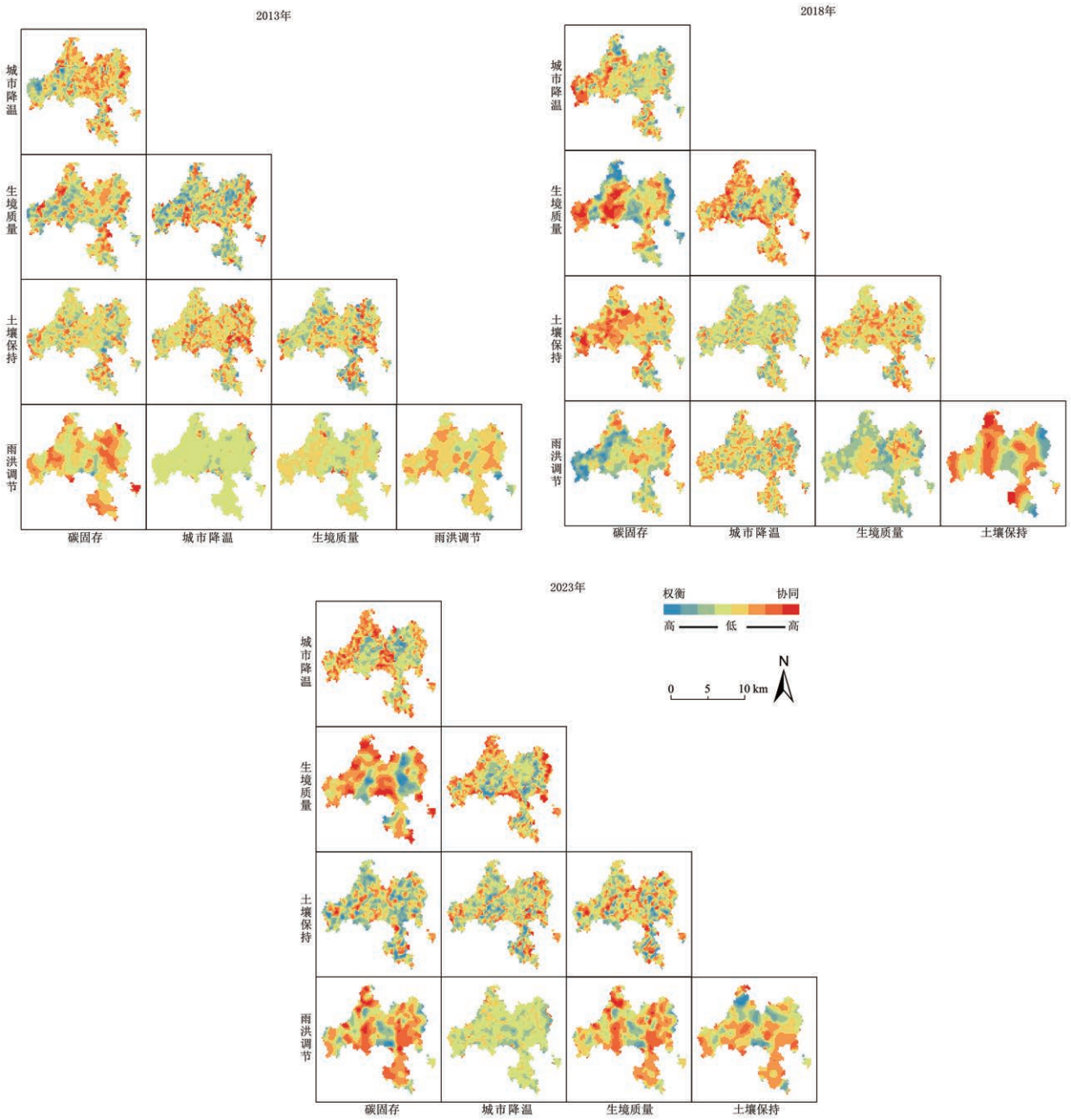
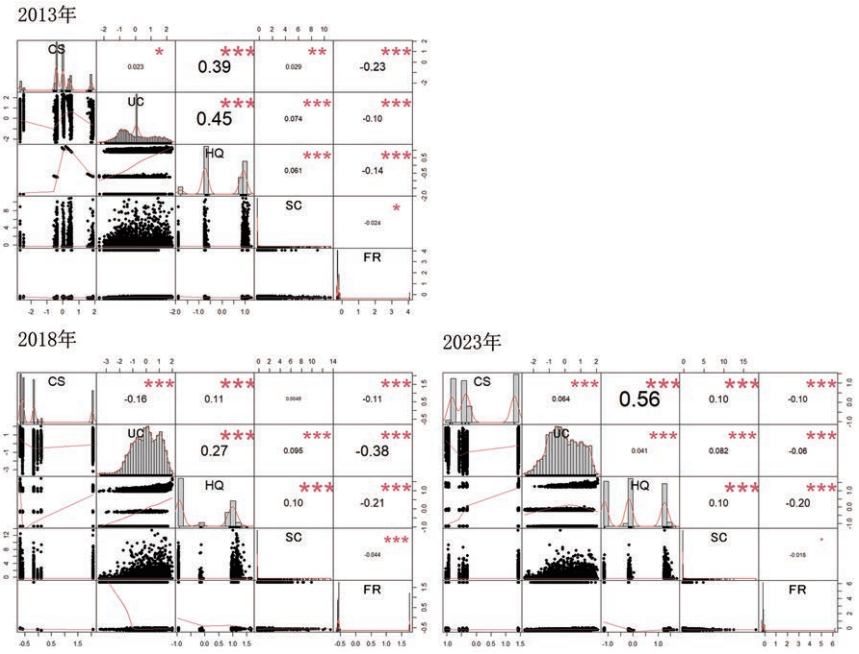


图 3 桂林市中心城区 2013—2023 年生态系统服务间空间权衡与协同关系

3.3 生态系统服务关系的驱动机制

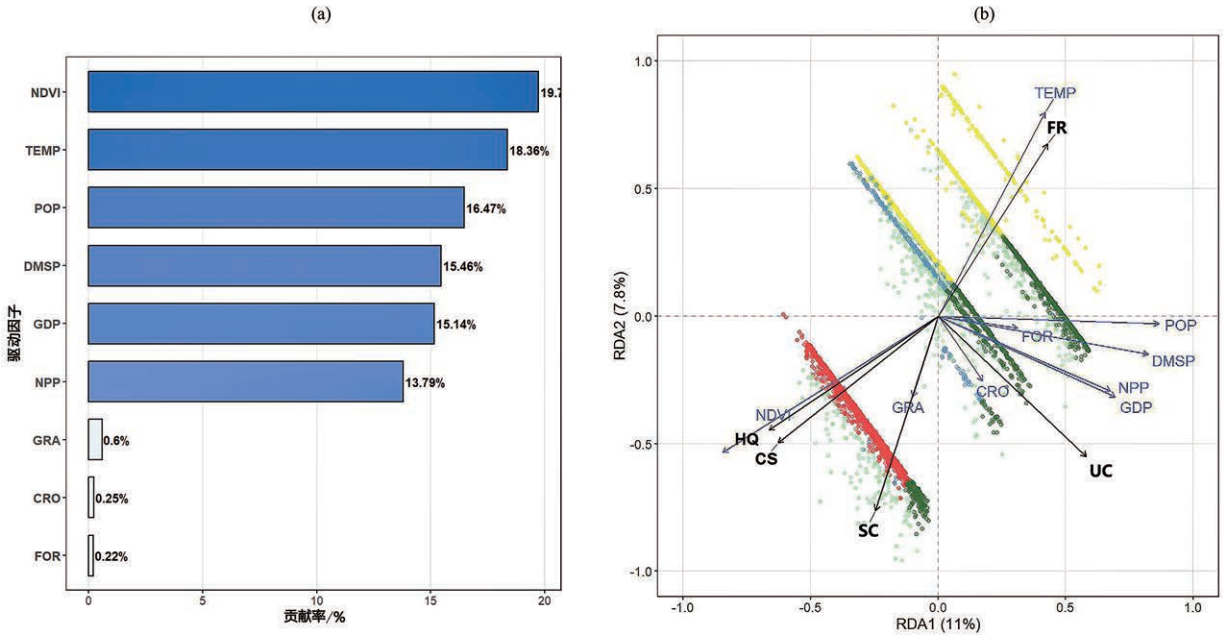
冗余分析（图 5）表明，桂林市中心城区生态系统服务受自然与社会经济因素共同影响。归一化植被指数（NDVI）作为解释力最强的驱动因子（贡献率 19.7%），与碳固存、生境质量和土壤保持等服务均呈显著正相关。在喀斯特生态脆弱区，NDVI 不仅反映植被覆盖，也指示生态恢复状态，其变化与浅薄土壤层的固持效应及碳积累过程紧密相关，因而成为调节多项服务协同变化的关键指标。

相比之下，林地、草地和耕地等土地利用类型的直接贡献率较低（分别为 0.22%、0.6% 和 0.25%），说明在喀斯特城市生态系统中，相比于土地覆盖是林地、草地还是耕地，同一土地覆盖类型内部的植被结构与功能差异对生态系统服务格局具有更强的解释力。温度、人口密度、夜间灯光指数和 GDP 也表现出重要驱动作用（贡献率分别为 18.36%、16.47%、15.46% 和 15.14%）。其中，城市降温服务与人口密度和 GDP 呈正相关，表明经济发展水平较高的地区可能通过增加绿化、优化建筑布局等措施缓解了热岛效应。



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

图 4　桂林市中心城区 5 种生态系统服务权衡/协同关系



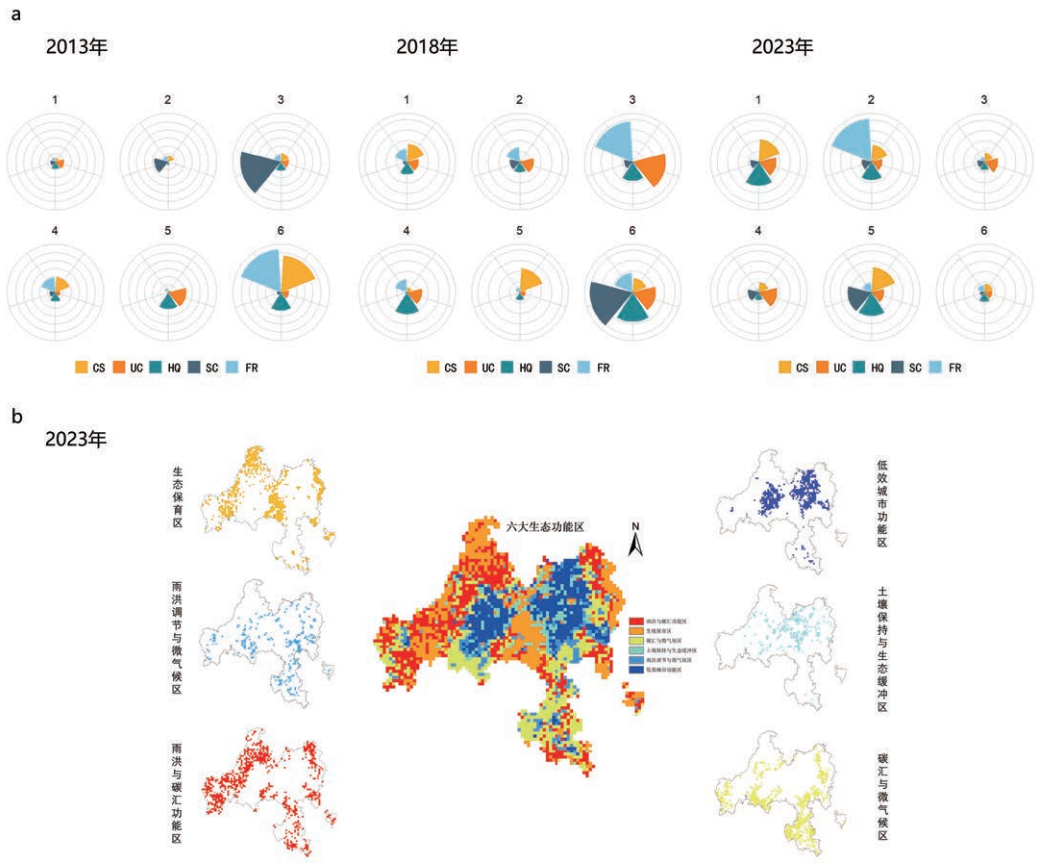
注：NDVI：归一化植被指数；TEMP：气温；POP：人口密度；DMSP：夜间灯光指数；GDP：国内生产总值；NPP：净初级生产力；GRA：草地占比；CRO：耕地占比；FOR：林地占比。

图 5　生态系统服务权衡协同关系的驱动因素及其贡献率分析结果

3.4　基于服务簇动态的生态功能分区及其演变

基于 2013、2018 和 2023 年生态系统服务量的聚类结果（图 6a），桂林市中心城区被划分为呈现非静态演替特征 6 大生态功能区（图 6b）。

时间演变上，生态保育区与碳汇与微气候区持续优化：前者由生境质量与城市降温主导，逐步发展为碳储存、生境质量与城市降温多元协同的高值格局；后者由低值混合状态提升为碳储存、城市降温与生境质量协同供给。雨洪调节与微气候区经历土壤保持主导—低值混合—雨洪调节主导的转型恢复。雨洪与碳汇功能区主导功能更替频繁，10 年间历经三次转换，生态稳定性较弱。土壤保持与生



注：a 图为 2013、2018、2023 年服务簇特征：序号 1~6 代表 6 个服务簇，其中簇 1 为碳汇与微气候区，簇 2 为雨洪调节与微气候区，簇 3 为低效城市功能区，簇 4 为雨洪与碳汇功能区，簇 5 为生态保育区，簇 6 为土壤保持与生态缓冲区；b 图为 2023 年 6 大生态功能区空间分布。

图 6 基于 SOM 聚类的生态系统服务簇动态及生态功能分区

态缓冲区随建设用地扩张持续收缩，高值区向核心林区退缩，缓冲功能弱化。低效城市功能区退化最为剧烈，在人口密度与 GDP 驱动下持续扩张并侵占生态空间，由雨洪调节与碳汇高值混合全面萎缩为各项服务均极低水平的“生态塌陷区”。

空间格局上，2023 年研究区形成“山地优化—水系恢复—城市塌陷”的梯度分异。生态保育区集中于北部和东部山地，发挥核心生态屏障作用；雨洪调节与微气候区沿中部水系分布，水文调节功能得以恢复；碳汇与微气候区位于南部，碳汇功能突出；雨洪与碳汇功能区分布于西部和南部山区；土壤保持与生态缓冲区呈破碎化分布；低效城市功能区镶嵌于中部城市核心区，受高强度城市化冲击，生态系统服务供给濒临丧失。

4 讨论

4.1 自然社会经济因子对生态系统服务的尺度效应

在喀斯特地区，植被在维持生态系统结构和保障服务供给方面发挥着基础性作用。NDVI 对生态系统服务变异的贡献率达 19.11%，在 9 个驱动因子中居于首位。该结果与王秋红等[28]对贵阳市的研究结论一致，后者发现碳固持和土壤保持服务在林地中表现最优，证实了喀斯特城市生态系统中植被覆盖对服务供给的显著正向驱动效应。进一步地，NDVI 不仅是植被覆盖密度的指示器，更直接关联着喀斯特地区独特的“植被恢复—土壤改良—水文调节—碳汇提升”联动增益链，为理解脆弱生境中植被的多重生态功能提供了实证支撑。与一般城市不同，GDP 及人口密度与城市降温服务呈正相关，这源于桂林作为国际旅游城市的特殊性：经济增长高度依赖于优良的生态环境，在临桂新区等新发展区，高 GDP 与高强度制度性生态投入（如高绿地率、通风廊道、海绵设施）同步推进，形成了增长驱动生态改善的本地路径。由此导致明显的空间分异：西南部自然本底区由 NDVI 等自然因子主导，生态过程稳定，

服务协同性强，管理应重在保障生态底线；中东部人为干扰区则表现为自然基底与人类活动的动态博弈，服务权衡突出且变化显著，管理需转向协调冲突、促进适应的精细化调控。。

4.2　城市化进程中生态系统服务权衡-协同关系的动态演变特征

喀斯特城市生态系统服务呈现显著的时空分异特征，空间格局上表现为西南协同、中东部权衡。这一格局与已有研究一致：李胡跃等[29]发现，黔中城市群人工地表严重侵占耕地、林地和草地，导致生态系统服务功能普遍下降；周豹等[30]进一步指出，滇东南喀斯特地区 2000—2020 年间建设用地显著扩张，生态系统服务功能持续下降，且“西南多山、东南平坝”的地形格局塑造了服务空间分异。该格局源于自然本底条件与人类活动强度在空间上的梯度耦合：西南山区受陡峭地形限制，开发强度较低，保存较好的土壤-植被-水文系统使土壤保持、雨洪调节等服务之间呈现内在协同；中东部城市化区域地形平坦，建设用地扩张迅速，不透水面割裂了地表水文连续性，导致上述服务间的协同关系在 2018 年随极端降雨事件转为显著权衡。此外，林地增长对碳储存与城市降温的协同效益后期有所减弱，说明在有限的城市空间内，新增绿地的生态效益不仅取决于绿量，更依赖于其空间布局与结构组成。地形与土地利用共同塑造了“西协同-东权衡”的格局，而城市化进程中生态阈值的突破与服务的非线性响应进一步驱动了格局的动态演变。研究表明，生态脆弱型城市的服务关系演变受本底约束、人类干扰及其交互效应的共同支配，生态管控需统筹空间异质性识别与动态过程调控。

4.3　服务簇导向的喀斯特城市国土空间差异化管控策略

基于生态系统服务簇的时空演变，将研究区划分为 6 大生态功能区。西南部以自然生态为主导的功能区（如雨洪与碳汇区、生境保育区等）整体表现为“生态盈余区”，生态系统服务协同性强、功能稳定；中东部城市化区域（如碳汇与微气候区、低效城市功能区等）则普遍面临“生态赤字”，服务间权衡突出，生态功能受到挤压。针对这一格局，需制定差异化管控策略：对西南部“生态盈余区”，应主动融入漓江流域国家重大生态工程，将功能区边界及主导服务评估结果作为生态保护红线动态管控及设计横向生态补偿机制的依据；对中东部“生态赤字区”，需将生态效益要求实质性纳入城市更新与详细规划的约束性指标，并通过推行地块开发生态贡献率制度、推广司法生态修复等政策工具，推动城市建设实现生态功能净增长。这一格局识别—政策衔接—机制创新的路径，为喀斯特城市推动生态认知向可实施的国土空间治理实践转化提供了具体方案。

4.4　展望

本研究中降水数据分辨率为1 km，限制了基于降水侵蚀力计算的土壤保持量的估算精度；InVEST 模型对建成区人工要素表征有限，制约降温、雨洪调节服务计算；制度性驱动因素（如空间规划）量化不足；分区方案未耦合未来情景，预见性受限。未来研究可从 4 个方面深化：融合高分辨率数据，发展适用建成区的生态过程模型；构建政策强度等空间代理变量，解析自然-社会-制度多维驱动；耦合系统动力学（SD）与未来土地利用模拟（FLUS）等模型，模拟服务动态演变以提升分区预测性；推动分区方案与国土空间规划的制度衔接。

5　结论

土地利用变化驱动了生态系统服务的系统性响应，印证了土地利用-生态过程-服务功能的级联效应。生态系统服务间的关系呈现稳定的空间分异，即“西南生态盈余-中东部生态赤字”的空间分异规律，揭示了自然本底与人类活动对生态功能关系的决定性影响。服务格局由分区主导的驱动机制塑造，为通过规划引导实现城市化与局部生态改善的短期协同提供了依据。生态功能分区为差异化管控提供了直接依据，为从静态保护转向动态精准治理提供了空间靶向。本研究在机理上揭示了自然-人文梯度耦合下的服务空间分异规律，可为黄土高原、干旱河谷等生态脆弱区的城市化生态效应研究提供参考；在方法上构建的服务评估-关系解析-簇群识别-分区管控框架，为城市生态评估向治理实践转化提供了方法论借鉴。

参考文献

[1] CHEN D, LI X, LI T, et al. Exploring spatio-temporal heterogeneity of ecosystem service interactions in rapidly urbanizing areas: trade-offs/synergistic changes and their driving mechanisms[J]. Ecological Indicators, 2025, 181: 114400.

[2] FU B, LIU Y, ZHAO W, et al. The emerging "pattern-process-service-sustainability" paradigm in landscape ecology [J]. Landscape Ecology, 2025, 40(3): 54..

[3] 蔡佳亮, 殷贺, 黄艺. 生态功能区划理论研究进展[J]. 生态学报, 2010, 30(11): 3018-3027.

[4] 刘焱序, 傅伯杰, 王帅, 等. 从生物地理区划到生态功能区划: 全球生态区划研究进展[J]. 生态学报, 2017, 37(23): 7761-7768.

[5] 王建鹏, 彭叶林, 郑亮, 等. 长江黄河流域生态系统服务时空特征及驱动因素[J]. 水土保持研究, 2025, 32(5): 341-351.

[6] ZHOU J, YANG J, TANG Z, 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.

[7] YU H, JIANG J, GU X, et al. Using dynamic Bayesian belief networks to infer the effects of climate change and human activities on changes in regional ecosystem services[J]. Ecological Indicators, 2025, 170: 113023.

[8] 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.

[9] CHANG B, CHEN B, CHEN W, et al. Analysis of trade-off and synergy of ecosystem services and driving forces in urban agglomerations in Northern China [J]. Ecological Indicators, 2024, 165: 112210.

[10] 张云路, 李雄, 田野. 基于景观生态学"源-汇"理论的市域尺度生态功能分区: 以内蒙古通辽市为例[J]. 生态学报, 2018, 38(1): 65-72.

[11] ZHOU J, YANG J, TANG Z, 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.

[12] 安健吉, 杨悦, 员学锋, 等. 陕北地区生态系统服务的时空演变、集聚特征及权衡与协同关系[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 316-327, 335.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 明昊霖, 徐建刚, 吴军, 等. 土地利用变化情景下太湖流域碳储量估算与影响研究[J]. 地理空间信息, 2025, 23(1): 46-52.

[16] 王佳琪, 邢艳秋, 常晓晴, 等. 东北地区生态系统服务空间分布及其驱动因子分析[J]. 环境科学, 2024, 45(9): 5385-5394.

[17] 赵强, 王天鸿, 王涛, 等. 基于 InVEST 模型的长三角生态绿色一体化示范区生境质量时空演变特征分析[J]. 自然资源遥感, 2024, 36(03): 187-195.

[18] 吴福荣, 税伟, 马永强, 等. 基于生态系统服务簇的珠江源区生态功能分区[J]. 水生态学杂志, 2025, 46(1): 177-188.

[19] 辛儒鸿, 曾坚, 李凯, 等. 城市热环境调节服务供需失衡关键区识别与优先级划分[J]. 地理研究, 2022, 41(11): 3124-3142.

[20] CHEN H, YAN W, LIZ, et al. Spatial patterns of associations among ecosystem services across different spatial scales in metropolitan areas: a case study of Shanghai, China [J]. Ecological Indicators, 2022, 136: 108682.

[21] 辛儒鸿, 曾坚, 李凯, 等. 城市内涝调节服务供需关键区识别与优先级划分[J]. 生态学报, 2022, 42(2): 500-512.

[22] ZENG J W, XU J P, LIW Y, et al. Evaluating trade-off and synergies of ecosystem services values of a representative resources-based urban ecosystem: a coupled modeling framework applied to Panzhihua city, China[J]. Remote Sensing, 2022, 14(20): 5282.

[23] 牛丽楠, 邵全琴, 陈美祺, 等. 2000—2020 年长江流域生态系统服务变化及其权衡协同关系[J]. 资源科学, 2024, 46(5): 853-866.

[24] 陈勇, 钟浩强, 李森, 等. 宁夏盐池县生态系统服务权衡/协同关系与功能分区[J/OL]. 草业科学, 1-18[2026-05-14]. https://link.cnki.net/urlid/62.1069.S.20250929.2101.008.

[25] 武燕, 吴映梅, 高彬嫔, 等. 成渝城市群生态系统服务价值与人类活动强度空间关系[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 173-182.

[26] 徐慧, 高雨慧, 周强, 等. 基于土地利用结构的河流岸带生态系统服务簇识别[J]. 水生态学杂志, 2024, 45(3): 52-59.

[27] 燕山, 谷先坤, 唐晟凯, 等. 东太湖鱼类群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2021, 41(2): 769-780.

[28] 王秋红, 王勇, 李维杰, 等. 喀斯特山地城市生态系统服务变化及关系研究: 以贵阳市为例[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(5): 158-168.

[29] 李胡跃, 戴全厚, 胡泽银, 等. 黔中城市群生态系统服务价值评估及预测[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 248-257.

[30] 周豹, 陈国平, 赵俊三, 等. 滇东南喀斯特地区生态系统服务时空演变及权衡协同关系[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(11): 123-142.