

引用格式: 王贵卫, 张怡婧, 朱灿, 等. 供需视角下杭州都市圈社会-生态安全格局演变及优化[J]. 浙江农林大学学报, 2026, 43(X): 1-11. WANG Guiwei, ZHANG Yijing, ZHU Can, et al. Supply-demand driven evolution and optimization of socio-ecological security pattern in Hangzhou metropolitan circle[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2026, 43(X): 1-11.

供需视角下杭州都市圈社会-生态安全格局演变及优化

王贵卫, 张怡婧, 朱 灿, 陈思如, 黄奕婷, 俞昕恬, 蔡 越, 邵 锋

(浙江农林大学 风景园林与建筑学院, 浙江 杭州 311300)

摘要: 【目的】将生态系统服务供需纳入生态安全格局, 为揭示生态过程与社会活动之间的动态联系提供新途径。

【方法】以杭州都市圈为研究对象, 通过土地利用数据、生态遥感数据及基础地理数据等多源数据, 综合运用InVEST、ArcGIS量化2004—2024年碳固存、水源涵养、粮食生产、生境质量及景观游憩5类生态系统服务供需, 利用电路理论和差异化阻力面分析, 构建和优化社会-生态安全格局。【结果】①综合生态系统服务供需匹配形成“西盈东赤”的空间格局, 经济增长(系数绝对均值0.91)是供需失衡加剧的核心驱动力。②2004—2024年生态源地面积大幅缩减2 026.11 km², 需求源地面积仅缩减177.80 km²。③西部生态廊道呈“长而集中”的蛛网状分布, 供需廊道形成“短而稀疏”的分散格局。生态夹点数量增加20个, 生态障碍点增加13个。④2024年, 共识别供需节点8处, 优化廊道14条。基于2024年杭州都市圈生态系统服务供需关系及社会-生态安全格局时空特征, 形成“三带三群四区”的优化布局方案。【结论】揭示杭州都市圈生态系统服务供需失衡下的社会-生态安全格局空间错配, 未来可通过保护西部生态源地、修复中部断裂廊道及调控东部需求热点的策略, 推动社会-生态系统从空间适配走向功能协同。图5表3参35

关键词: 生态安全格局; 生态系统服务供需; 社会-生态系统; 生态福祉; 电路理论

中图分类号: X826 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2026)00-0001-11

Supply-demand driven evolution and optimization of socio-ecological security pattern in Hangzhou metropolitan circle

WANG Guiwei, ZHANG Yijing, ZHU Can, CHEN Siru, HUANG Yiting, YU Xintian, CAI Yue, SHAO Feng

(College of Landscape Architecture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] Integrating ecosystem service supply and demand into ecological security patterns has opened up a new approach for revealing the dynamic connections between ecological processes and societal activities. [Method] Taking Hangzhou metropolitan circle as a case study, this study used multi-source data (land use, ecological remote sensing, basic geographic data) and models (InVEST, ArcGIS, Linkage Mapper) to quantify five ecosystem services (carbon sequestration, water conservation, food production, habitat quality, landscape recreation) from 2004 to 2024. then extracted ecological corridors, ecological pinch points, and ecological barrier points from an ecological resistance surface, and supply-demand corridors from a movement resistance surface to construct a social-ecological security pattern, which was optimized by setting supply-demand nodes and extracting optimized corridors. [Result] (1) The matching of supply and demand of comprehensive ecosystem services formed a spatial pattern of “surplus in the west and deficit in the east.” Economic growth (absolute mean value of coefficient: 0.91) was the core driving force for the aggravation of supply and demand imbalance. (2) From 2004 to 2024, the ecological sources were greatly reduced by 2026.11

收稿日期: 2026-03-06; 修回日期: 2026-07-31

基金项目: 浙江农林大学省级大学生创新训练计划项目 (S202510341075)

作者简介: 王贵卫 (ORCID: 0009-0009-5132-5976), 从事风景园林规划与设计研究。E-mail: guiweiwang@stu.zafu.edu.cn。通信作者: 邵锋 (ORCID: 0000-0001-9874-9500), 教授, 博士, 博士生导师, 从事风景园林规划与设计研究。E-mail: shaofeng@zafu.edu.cn

km², and the demand sources were slightly reduced by 177.80 km². (3) The ecological corridors in the western region were “long and concentrated” cobweb-like distribution, and the supply-demand corridors formed a “short and sparse” decentralized pattern. The number of pinch points increased by 20, and the number of barrier points increased by 13. (4) In 2024, 8 supply-demand nodes and 14 optimized corridors were identified. Based on the supply-demand relationship of ecosystem services and spatiotemporal characteristics of social-ecological security pattern in Hangzhou metropolitan circle in 2024, an optimized layout scheme of “three belts, three clusters and four zones” was formed. [Conclusion] This study reveals the spatial mismatch pattern of the social-ecological security pattern of the imbalance between supply and demand of ecosystem services in Hangzhou metropolitan circle. Future efforts should protect the western ecological source areas, restore the broken corridors in the central region, and regulate the demand hotspots in the eastern region, driving the social-ecological system from spatial alignment toward functional synergy. [Ch, 5 fig. 3 tab. 35 ref.]

Key words: ecological security pattern; ecosystem service supply and demand; social-ecological system; ecological well-being; circuit theory

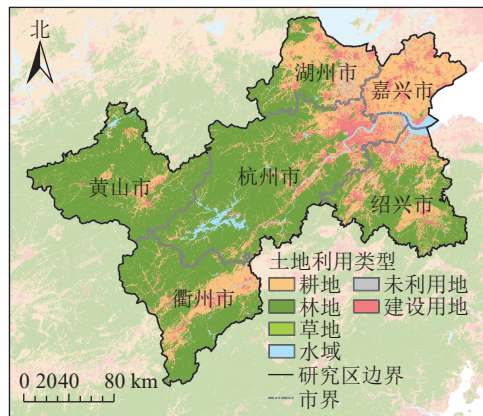
生态系统服务作为连接人类社会与自然生态系统的关键纽带,保障其供应能力来平衡人类需求,对维护区域生态安全与可持续发展至关重要^[1-2]。随着城市化进程加快,引发了生境破坏、生态系统服务功能退化及生态系统服务供需空间错配等一系列生态问题^[3-5]。生态安全格局通过识别、修复及重构关键生态要素,优化生态系统服务供给,成为保障区域生态安全的重要手段^[6]。传统生态安全格局研究形成了“源地-阻力面-廊道”的经典范式,聚焦于维持自然生态系统结构和功能的完整性^[7]。当前随着人类福祉提升逐步成为全球可持续发展议程中的核心议题^[8],生态安全格局研究开始向探索自然生态基底与人类经济活动耦合协同,构建以生态系统服务供需理论为核心的生态安全格局方向发展。研究主要分为3个方面:一是以生态系统服务供需评估为基础,选取供需耦合条件好的斑块或结合生态敏感性、景观连通性及生态风险等指数,筛选高质量生态斑块作为生态源地,以此为起始点构建生态安全格局^[9-11]。这类研究虽将人类需求作为重要的考虑因素,但未刻画供给与需求区域之间有效路径,无法反映两者之间的流动联系;二是考虑生态系统服务从供给向需求的流动特征,结合供给、需求及供需比指数选取生态源地和需求源地。提取连接生态源地的生态廊道和连接生态源地与需求源地的供需廊道^[12-13],为缓解供需空间错配提供了新思路。这类研究通常采用同一套阻力面来构建不同类型的廊道,但未充分考虑人类获取生态系统服务的可达性,难以区分自然生态过程和社会经济过程的阻抗作用;三是通过构建生态阻力面来提取生态廊道,构建表征人类获取生态系统服务可达性的移动阻力面来提取供需廊道^[14-15]。这类研究普遍采用人口密度、国内生产总值(gross domestic product, GDP)及土地利用强度等指标构建统一的评估体系,间接反映人类需求,难以区分不同类型生态系统服务需求和空间位置。研究尺度上多聚焦于区域尺度^[16]、自然地理单元尺度^[17]及行政尺度^[18]。都市圈尺度下以生态系统服务供需理论为核心的生态安全格局研究多基于静态或单期数据,以识别供需耦合条件好的生态源地来构建生态安全格局^[19],缺乏聚焦人类生态需求的需求源地和供需廊道的系统性识别。本研究以杭州都市圈为研究对象,基于2004—2024年土地利用数据、生态遥感数据及基础地理数据等多源数据,量化碳固存、水源涵养、粮食生产、生境质量及景观游憩5类生态系统服务的供需动态,精准刻画不同类型生态系统服务供给和需求的空间位置。通过构建差异化的生态阻力面和移动阻力面来提取生态廊道与供需廊道并行的双网络结构,识别关键供需节点并优化网络结构,最终形成“社会-生态”协同的复合社会-生态安全格局,以期成为城市化水平不均衡都市圈的“社会-生态系统”协同治理提供科学依据。

1 研究区概况

杭州都市圈地跨浙皖两省,是长三角打造的以杭州为中心,联结湖州、嘉兴、绍兴、衢州、黄山五市的“金南翼”(图1)。规划总面积为53 239.00 km²,其中,耕地13 723.88 km²、林地33 493.33 km²、水域1 799.99 km²。整体地势西南高、东北低,地貌涵盖西部天目山-千里岗山地的中山丘陵、中部杭嘉

湖-宁绍平原水网及东部杭州湾沿岸滨海湿地。截至 2024 年末，杭州都市圈常住人口为 2 545.56 万，比上年末增加 18.49 万，城镇人口为 2 115.20 万，占常住人口的 83.09%，地区生产总值达 4.54 万亿元，是中国东部人口最稠密、经济活动最活跃的区域之一。

鉴于钱塘江水系发源于黄山北源新安江和衢州南源兰江，流经杭州、湖州、嘉兴、绍兴等市域入海，将六市串联为“源头保护-中游利用-下游修复”的完整功能链条，为量化生态安全格局供给与需求源地间流动过程提供天然场地。考虑到该区域西部山区森林覆盖率高，是碳固存、水源涵养及生境质量等服务的主要供给区；中东部平原城镇人口和产业高度集聚，对粮食生产、休闲游憩等服务需求持续攀升，是探究生态系统服务供需错配的典型代表。依据“整体保护、系统修复”理念，该区域跨省域的空间尺度实现了从局部治理向区域协同的范式转型。综上，杭州都市圈为探究生态系统服务供需错配、构建面向整体保护和系统修复的复合社会-生态安全格局，提供了代表性案例。



基于国家地理信息公共服务平台审图号为 GS(2024)0650 号的标准地图制作，底图边界无修改。

图 1 研究区概况示意图

Figure 1 General situation of the study area

2 研究方法

2.1 数据来源

本研究整合自然地理、气象数据、遥感影像及社会经济数据等多源数据，定量评估生态系统服务供需格局，构建社会-生态安全格局。数据来源如表 1 所示，所有数据集均以土地利用数据为基准进行空间分辨率和坐标系统一。

2.2 生态系统服务供需分析

2.2.1 生态系统服务供需量化 联合国千年生态系统评估 (millennium ecosystem assessment, MEA) 将生态系统服务分为供给、调节、支持、文化四大服务体系^[21]。杭州都市圈东部的杭嘉湖平原是长三角重要的商品粮基地，钱塘江水系贯穿全域，因此，选择粮食生产、水源涵养服务作为评估供需关系的关键供给服务指标；鉴于杭州都市圈局部城镇化水平高、热岛效应明显，选取碳固存服务作为关键调节服务指标；杭州都市圈西部山区有多个国家级自然保护区，选取生境质量服务反映生态系统完整性和生物多样性维持能力，是支持服务的重要代表；杭州都市圈拥有西湖、千岛湖、黄山等著名风景名胜，为提升居民福祉选取景观游憩服务体现文化服务价值。

粮食生产服务供给通过归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 对粮食产量进行空间化处理获得^[22]；碳固存、水源涵养及生境质量供给依托 InVEST 模型进行测算，景观游憩供给基于单位面积的生态空间面积占比计算得到^[23]。水源涵养需求通过不同类型用水量，根据人口、社会经济数据及土地利用类型进行空间化处理获取。粮食生产、碳固存、生境质量、景观游憩需求根据相关指标按照人口密度分配到栅格获得^[24]。各项生态系统服务供需评估方法见表 2。

表 1 数据来源

Table 1 Data sources		
数据类型	数据来源	数据精度
土地利用类型	中国土地覆盖数据集	30 m
数字高程模型	地理空间数据云 ASTER GDEM	90 m
归一化植被指数	美国国家航空航天局(NASA)地球观测数据	1 km
降水量	国家冰川冻土沙漠科学数据中心	1 km
潜在蒸散量	国家冰川冻土沙漠科学数据中心	1 km
土壤数据	世界土壤数据库土壤数据集	1 km
根限制层深度	[20]	100 m
夜间灯光数据	Harvard Dataverse	1 km
国内生产总值 (GDP)空间分布	国家青藏高原科学数据中心	1 km
人口空间分布	LandScan	1 km
城镇化率	欧盟委员会联合研究中心GHSL-SMOD	1 km
社会-经济数据	中国统计年鉴、浙江省统计年鉴、安徽省统计年鉴	

表 2 生态系统服务供需评估方法

Table 2 Methods for evaluating supply and demand of ecosystem services

生态系统服务		计算方法	变量解释
粮食生产	供给	$S_{FD} = \frac{I_{NDVIi}}{I_{NDVIsun}} \times G_{sum}$	S_{FD} 为粮食生产服务供给量; I_{NDVIi} 为栅格 <i>i</i> 的归一化植被指数(NDVI), $I_{NDVIsun}$ 为研究区耕地像元内NDVI总值, G_{sum} 为粮食总产量
	需求	$D_{FD} = P_{pop} \times D_{perfood}$	D_{FD} 为粮食生产服务需求量; P_{pop} 为人口密度, $D_{perfood}$ 为人均粮食消耗量
水源涵养	供给	$S_{WC} = P_i - A_{ETi}$	S_{WC} 为水源涵养服务供给量; P_i 为栅格 <i>i</i> 的年平均降水量, A_{ETi} 为栅格 <i>i</i> 的年实际蒸发量
	需求	$D_{WC} = C_i \times D_{agr} + G_i \times D_{ind} + P_{pop} \times D_{dom}$	D_{WC} 为水源涵养服务需求量; C_i 和 D_{agr} 分别为耕地面积和每亩耕地的农业用水量, G_i 和 D_{ind} 分别为国内生产总值和每万元国内生产总值的工业用水量, P_{pop} 和 D_{dom} 分别人口密度和居民人均生活用水量
碳固存	供给	$S_{CS} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead}$	S_{CS} 为碳固存服务供给量; C_{above} 为地上生物碳密度, C_{below} 为地下生物碳密度, C_{soil} 为土壤碳密度, C_{dead} 为死亡有机物中碳密度
	需求	$D_{CS} = P_{pop} \times P_c$	D_{CS} 为碳固存服务需求量; P_{pop} 为人口密度, P_c 为年人均碳排放量
生境质量	供给	$S_{HQ} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{ij}^z}{D_{ij}^z - K^z} \right) \right]$	S_{HQ} 为生境质量服务供给量; H_j 为土地利用类型 <i>j</i> 的栖息地适宜性, D_{ij} 为土地利用类型 <i>j</i> 中像元 <i>i</i> 的栖息地威胁等级, 主要由威胁因素的影响范围、权重及衰减类型决定, k 为半饱和常数, z 为模型默认参数
	需求	$D_{HQ} = \ln(P_{popi}) + \ln(G_i) + \ln(L_i)$	D_{HQ} 为生境质量服务需求量; P_{popi} 、 G_i 及 L_i 分别为栅格 <i>i</i> 的人口数量、国内生产总值及夜间灯光遥感强度
景观游憩	供给	$S_{LR} = \frac{A_{es}}{A}$	S_{LR} 为景观游憩服务供给量; A_{es} 和 A 分别为网格内生态用地面积和网格总面积
	需求	$D_{LR} = P_{pop} \times A_{green}$	D_{LR} 为景观游憩服务需求量; P_{pop} 为人口密度, A_{green} 为人均绿地面积

2.2.2 生态系统服务供需匹配状态评估 生态系统服务供需比可用于揭示生态系统服务供需失衡程度。综合生态系统服务供需比则可反映多项生态系统服务的整体供需状态^[12]。因此, 选取 5 项生态系统服务供需比指标, 采用熵权法确定其权重, 计算综合生态系统服务供需比指数来反映综合供需匹配状况。公式如下:

$$E_{SDR} = \frac{E_S - E_D}{(E_{Smax} + E_{Dmax})/2} \quad (1)$$

式(1)中, E_S 和 E_D 为生态系统服务供给和需求; E_{Smax} 和 E_{Dmax} 为生态系统服务供给和需求的最大值。 $E_{SDR} > 0$ 表示生态盈余; $E_{SDR} < 0$ 表示生态赤字; $E_{SDR} = 0$ 表示供需平衡, 但平衡难以真正实现, 故将 E_{SDR} 值在 $[-0.001, 0.001]$ 范围内定义为平衡状态。

$$C_{ESDR} = \omega_i \times \sum_{i=1}^n E_{SDRi} \quad (2)$$

式(2)中, ω_i 和 E_{SDRi} 分别为各生态系统服务供需比的权重和数值, n 为 5 种生态系统服务类型。

2.2.3 地理加权回归分析 为定量揭示各驱动因素对供需格局演变的驱动作用和贡献度, 以综合生态系统服务供需比变化量为因变量, 选取人口密度变化量、GDP 变化量、建设用地扩张速度、城市化率变化量及 NDVI 变化量为自变量, 均经 Z-score 标准化处理后进行地理加权回归分析。提取局部回归系数, 以有效点 (条件数 < 30) 的系数绝对值均值反映贡献度, 并统计正负系数比例判别驱动方向。

2.3 社会-生态安全格局构建

2.3.1 源地识别 生态源地是能够提供高生态系统服务价值和生态本底条件最佳的斑块^[25]。需求源地指内部生态系统功能较弱、对外部生态系统服务需求较高的斑块。本研究将综合生态系统服务供给、需求及综合生态系统服务供需比基于分位数分为 5 个等级^[26], 选取综合供给和综合生态系统服务供需比前 20% 的交集为初始生态源地, 综合需求前 20% 和综合生态系统服务供需比后 20% 的交集为初始需求源地。进一步排除面积小于 18 km² 的生态源地和 15 km² 的需求源地, 确定最终源地。

2.3.2 阻力面构建 生态阻力面是物种在不同景观间迁移或生态流流动过程中所需克服的通行难度^[27]。选取土地利用类型、高程、NDVI 及坡度作为阻力因子构建初始生态阻力面, 并引入生态系统服务需求

作为人类活动强度的表征指标，对生态阻力面进行修正。计算公式如下：

$$R_X = \frac{E_{Dx}}{E_{Dy}} \times R。 \quad (3)$$

式 (3) 中， R_X 为栅格 x 修正后的生态阻力面； E_{Dx} 为栅格 x 的生态系统服务需求值， E_{Dy} 为栅格 x 对应的用地类型 y 的平均生态系统服务需求值， R 为初始生态阻力面。

移动阻力面是在供需失衡背景下，人们获取高质量生态产品和服务时所面临的空间难度^[28]。鉴于研究目标侧重于模拟生态服务从生态源地向需求源地流动的空间路径和传输阻力，选择成本距离法计算生态空间可达性以构建移动阻力面，通过量化服务流的流动趋势对移动阻力面进行修正。计算公式如下：

$$R_C = \frac{E_{Sx}}{E_{Sy}} \times A_x。 \quad (4)$$

式 (4) 中， R_C 为修正后的移动阻力面， E_{Sx} 为生态系统服务供给的倒数值， E_{Sy} 为栅格 x 对应的用地类型 y 的平均生态系统服务供给的倒数值， A_x 为空间可达性阻力值。

2.3.3 廊道提取 基于电路理论，本研究使用 Linkage Mapper 工具箱提取廊道。生态廊道以生态阻力面为介质连接生态源地，增强景观连通性和生态系统稳定性^[29]。供需廊道是指生态服务从供给区向需求区的潜在传输路径，以移动阻力面为介质仅提取生态源地与需求源地之间的连接，使人类能够更容易地获取生态系统惠益^[15]。以移动阻力面为介质导出的生态源地-生态源地连接 (不涉及供需服务传输) 和需求源地-需求源地连接 (不具备服务传输功能) 均不纳入供需廊道网络。

2.3.4 节点提取 生态节点包括生态夹点和生态障碍点^[30]。生态夹点指廊道内电流密度较高的区域，是维持景观连通性的脆弱环节和关键节点。生态障碍点指廊道内显著阻碍或抑制生态流的位置，修复障碍点可以增强整体连通性，分别由 Linkage Mapper 软件中的 Pinchpoint Mapper 和 Barrier Mapper 工具识别。供需节点是位于生态供需盲区内具有高潜在供给能力的斑块^[28]。通过增加生态系统服务供给能力较强但面积小于 5 km² 的斑块作为供需节点构建优化廊道，提高供给与需求源地间的连通性，优化社会-生态安全网络。

3 结果与分析

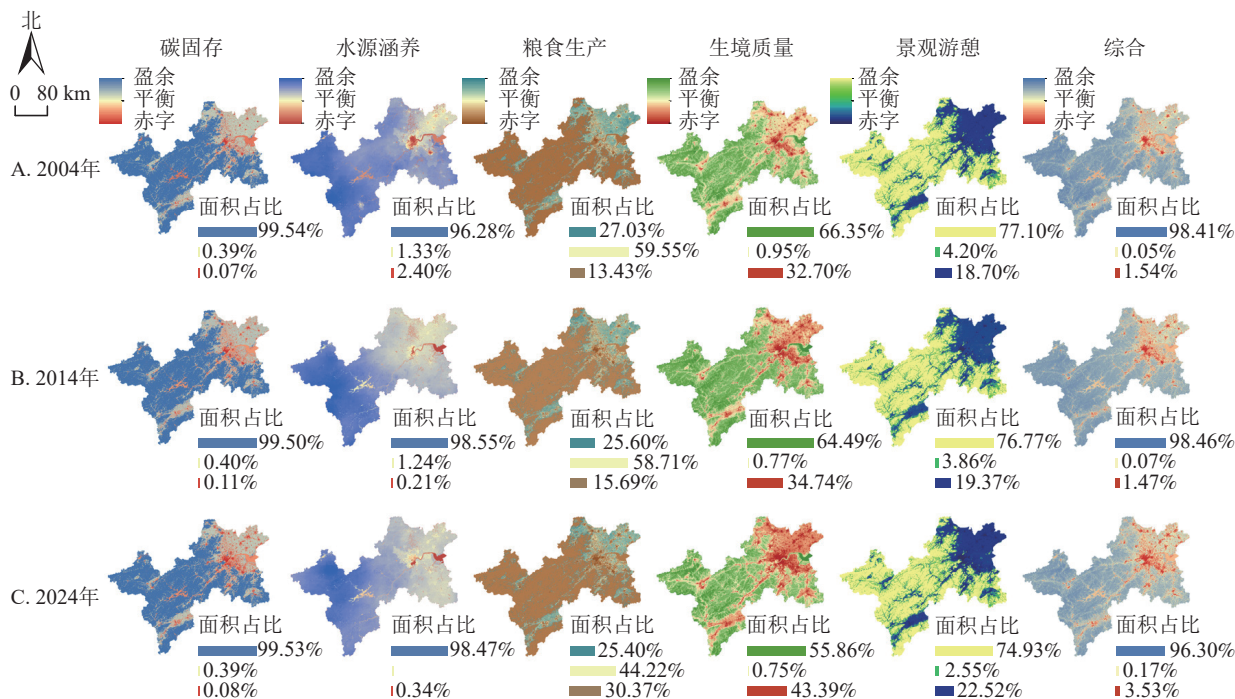
3.1 生态系统服务供需格局演变特征及驱动机制分析

3.1.1 生态系统服务供需匹配演变特征 图 2 显示：碳固存和水源涵养服务盈余最为显著，盈余区面积占比常年超 96%。景观游憩服务供需最为稳定，盈余区面积占比从 2004 年 77.10% 小幅下降到 2024 年的 74.93%。生境质量和粮食生产服务赤字规模持续扩大，赤字区面积占比在 2004—2024 年分别扩大了 10.69% 和 13.94%。综合 5 项生态系统服务供需状况，综合供需比形成“西盈东赤”的空间格局。整体仍以盈余为主，但赤字区占比从 1.54% 升至 3.53%，平衡区略有增加，说明区域尺度上生态系统服务供需空间错配加剧，局部赤字风险上升。

3.1.2 供需失衡驱动机制定量分析 从整体区域平均绝对系数来看 (表 3)，各因素对供需失衡格局演变的贡献度由高到低依次为：GDP 变化量、人口密度变化量、建设用地扩张速度、NDVI 变化量、城镇化率变化量。人口密度变化量的负系数比例高达 89.97%，表明人口集聚普遍导致生态系统服务供需失衡，NDVI 变化量的正系数比例最高 (60.15%)，说明植被改善在大部分区域起到缓解供需矛盾的正向作用。经济增长、人口集聚及建设用地扩张是供需失衡加剧的核心驱动力，而植被改善提供了微弱但积极的调节作用。

3.2 社会-生态安全格局构建

3.2.1 生态源地和需求源地 图 3 显示：经筛选后 2004 年共识别生态源地 37 块 (9 739.23 km²)，2014 年杭州中部源地消失，数量锐减至 18 块 (8 890.15 km²)，这与当时生态保护范围不足密切相关。《杭州市生态环境功能区规划》(2008 年) 划定的禁止准入区面积仅占全市国土面积的 15.10%，导致西部源地未得到充分保护。2014 年生态环境部出台了《国家生态保护红线-生态功能基线划定技术指南 (试行)》，划定保护范围扩大，刚性约束力显著增强。2016 年国家全面启动山水林田湖草沙一体化保护和修复工程，2024 年生态源地得以恢复增至 44 块 (7 713.12 km²)，但 20 a 间源地总面积减少 2 026.11 km²，并向西



基于国家地理信息公共服务平台审图号为 GS(2024)0650 号的标准地图制作，底图边界无修改。

图 2 生态系统服务供需空间格局示意图

Figure 2 Spatial pattern of ecosystem services supply and demand

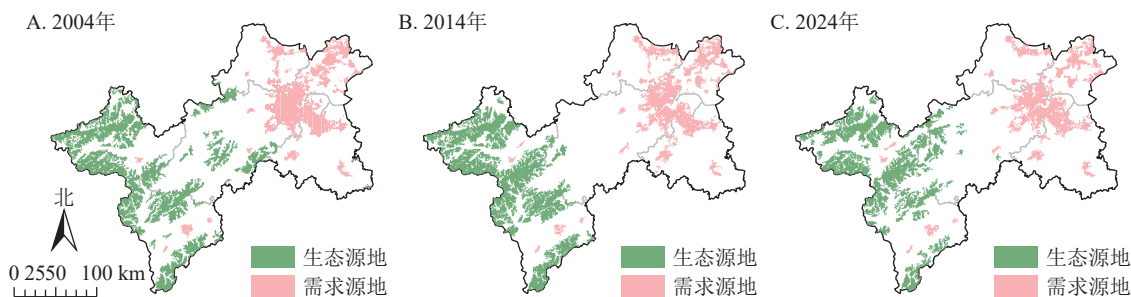
部山区持续收缩，斑块趋于破碎化。需求源地从 2004 年识别出 19 块 (4 859.75 km²) 到 2014 年 23 块 (4 913.53 km²)，持续增加至 2024 年 25 块 (4 681.95 km²)，总面积累计减少 177.80 km²。土地利用结构发生转型，主导地类由 2004 年耕地 (59.42%) 转为 2024 年建设用地 (58.77%)。空间上始终锁定东部城镇平原区和西部中心城区。为检验上述变化趋势的稳健性，采用分位数法将综合供给和供需比分为 4 类 (新增)、5 类 (主结果)、6 类 (新增) 等 3 个梯度提取初始源地进行对比分析。3 种阈值下生态源地均呈现数量持续下降、面积总体减少、空间分布集中的趋势。3 种阈值下需求源地数量均呈增加趋势，面积稳定或增加，表明源地的识别对阈值选择不敏感。

3.2.2 生态廊道和供需廊道 2004 年共识别生态廊道 84 条 (2 287.95 km)，生态夹点 71 个，生态障碍点 16 个 (图 4)。2014 年廊道数量锐减至 37 条 (698.91 km)，生态夹点和生态障碍点同时受到影响，数量分

表 3 各驱动因素的绝对均值与正负系数比例

Table 3 Absolute mean values and the ratio of positive to negative coefficients for each driver

自变量	系数绝对均值	正系数比例/%	负系数比例/%
GDP变化量	0.97	34.45	65.55
人口密度变化量	0.56	10.03	89.97
建设用地扩张速度	0.17	23.56	76.44
NDVI变化量	0.09	60.15	39.85
城镇化率变化量	0.04	44.46	55.54



基于国家地理信息公共服务平台审图号为 GS(2024)0650 号的标准地图制作，底图边界无修改。

图 3 生态源地和需求源地空间格局示意图

Figure 3 Spatial pattern of ecological sources and demand sources

别减少至 37 个和 8 个。2024 年廊道数量激增至 118 条 (2 254.65 km)，生态夹点和生态障碍点分别恢复至 51 个和 29 个。空间上聚集于西部地区，形成“长而集中”的蛛网状格局。经筛选剔除后，2004 年、2014 年及 2024 年共提取的有效供需廊道数量分别为 28 条、20 条及 27 条，总长度分别为 577.50、677.41 及 673.44 km。主要分布于中部和西部中心城区周边，呈现“短而稀疏”的分散格局。东部城镇集聚区生态源地基本消失，导致东部需求源地实际传输的生态系统服务面临源头枯竭风险，与生态廊道在西部山区的强化形成对照，供给端与需求端空间解耦加剧。以 2024 年数据为例，将最大连接最近邻数 (6、8) 和截断成本加权距离阈值 (100 000、400 000) 分别调整后重新提取廊道，结果均与主结果 (最近邻数 4，截断成本加权距离阈值 200 000) 一致，表明廊道网络对上述参数不敏感，结论具有稳健性。再次以最近邻数降为 2 重新提取廊道但网络过于稀疏，故本研究采用最近邻数 4 作为主结果。

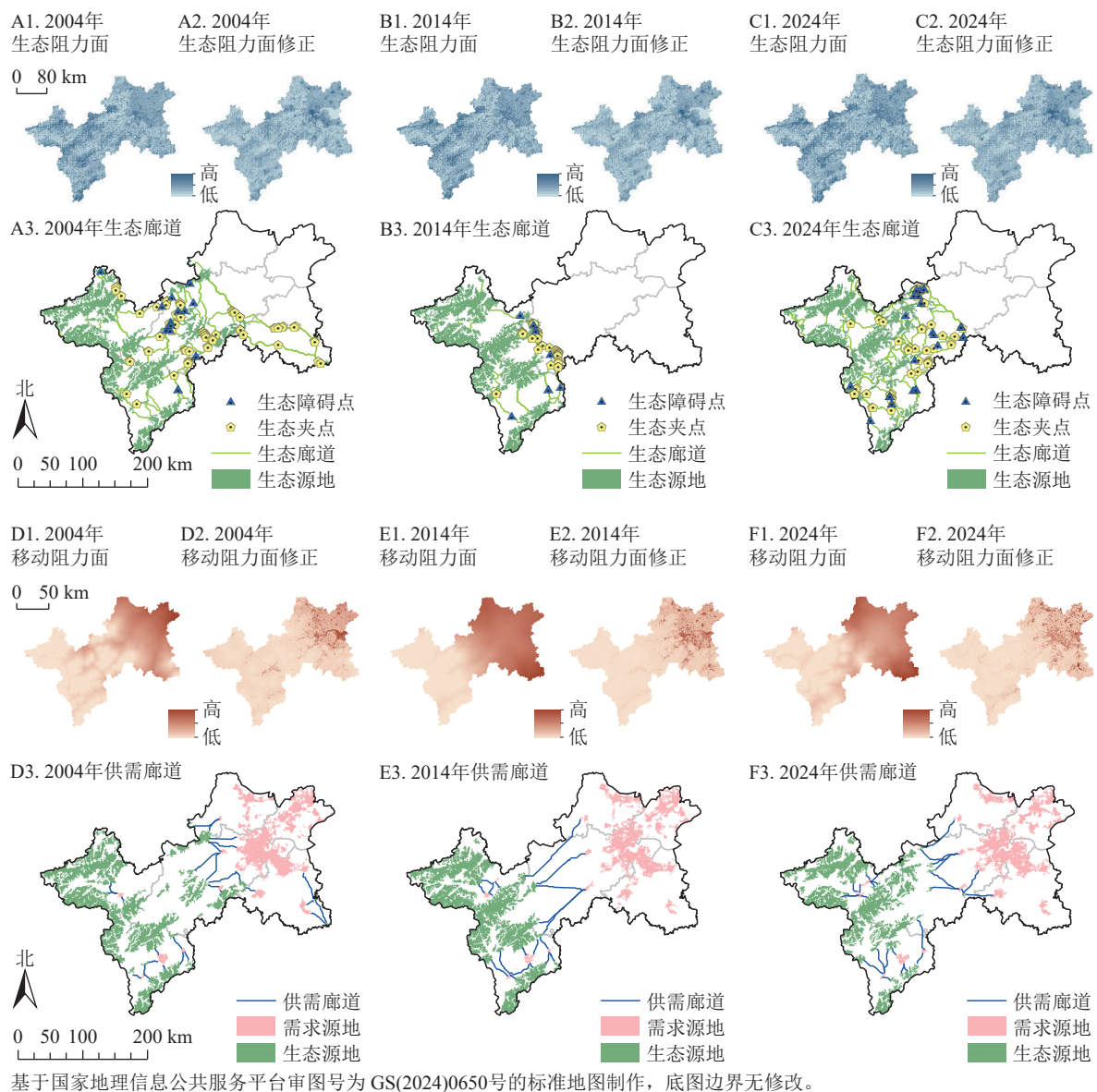


图 4 生态廊道和供需廊道空间格局示意图

Figure 4 Spatial pattern of ecological corridors and supply-demand corridors

3.3 社会-生态安全格局优化

通过分析 2004—2024 年社会-生态安全格局各组成部分的演变特征，发现东部地区生态源地严重匮乏，面临生态服务枯竭压力。本研究基于 2024 年杭州都市圈社会-生态安全格局在东部地区设置供需节点 8 处，以连接供需节点与孤立需求源地的廊道作为优化廊道，新增优化廊道 14 条，总长 329.99 km。通过构建“供需节点-优化廊道”的补充网络，东部需求源地获得与供给端的间接连接，提升生态服务

传输的空间可达性。基于优化后的社会-生态安全格局生态要素,构建“三带三群四区”的社会-生态安全格局优化布局方案(图5)。

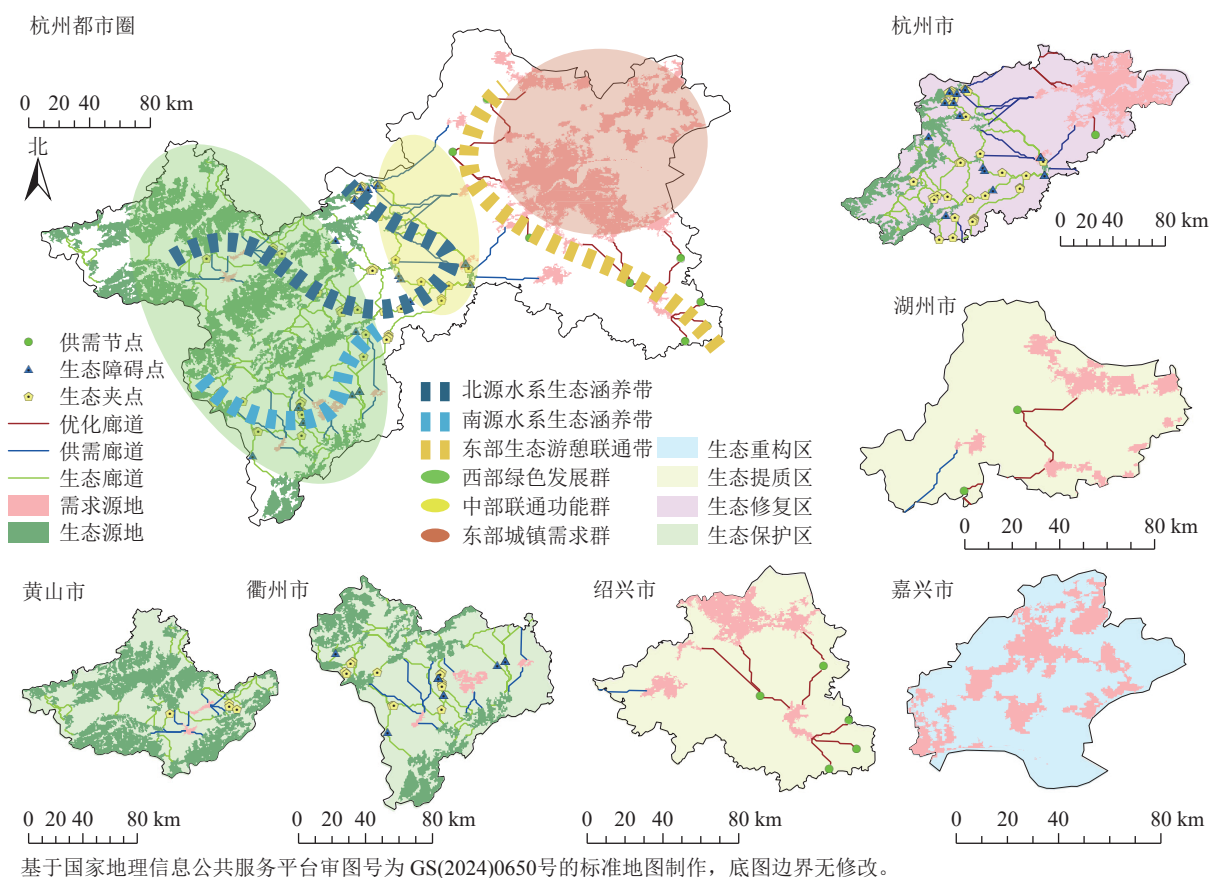


图5 社会-生态安全格局示意图

Figure 5 Spatial pattern of social-ecological security pattern

3.3.1 三带 北源水系生态涵养带沿钱塘江北源水系(新安江-千岛湖-分水江)分布,其内部大量生态夹点和生态障碍点集聚,是跨省生态流传输的关键瓶颈区;南源水系生态涵养带沿钱塘江南源水系(衢江)分布,同样密集分布生态夹点和障碍点,是保障南源生态服务稳定向下游输送的重要通道;东部生态游憩联通带依托供需节点和优化廊道分布,构建生态游憩网络,缓解东部生态源头枯竭风险。

3.3.2 三群 西部绿色发展群生态源地面积大、连续性好,是生态源地集群,也是全域生态服务供给的核心源头和重点开展跨省(浙皖)生态修复和协同发展的区域。东部城镇需求群是需求源地的集群区,区内需求源地高度集聚、生境空间极少,是高度城市化的经济发展核心区。中部联通功能群依托生态廊道与供需廊道密集交织,是连接西部供给与东部需求的关键传输枢纽,保障东西向生态流高效传输,缓解供需不平衡压力。

3.3.3 四区 生态重构区(嘉兴)仅含需求源地,生态本底薄弱,是都市圈内供需失衡最典型的赤字区,需进行生态重构,提升存量空间生态功能,缓解供需矛盾。生态提升区(绍兴、湖州)具备需求源地、供需节点及优化廊道,生态基础一般,依托供需节点和优化廊道,完善区域生态网络,提升游憩连通性质量。生态修复区(杭州)要素最为齐全且生态源地和需求源地面积比例相当,具有良好的生态环境和经济社会基础,需进行生态修复,锚固区域现状生态廊道和供需廊道,充分发挥生态和经济优势。生态保护区(黄山、衢州)中生态源地占主导,具有优异的生态系统服务供给能力,是全域主要的生态供给空间,应严格保护现状生态格局,从源头强化生态系统结构和功能。

4 讨论

2004—2024年杭州都市圈生态系统服务高供给区域位于西部林地占主导的山区,高需求区则锁定于

东部平原城镇群。由于自然资源禀赋和发展水平的异质性,越发达的城市区域生态系统服务供需总体失衡程度越高,这种环境不公平现象在现有文献中已有充分论证^[31-32]。将生态系统服务供需平衡纳入生态安全格局构建不仅对于可持续发展至关重要,也是提升人类福祉的关键举措^[33-34]。长三角地区以生态系统服务供需理论为核心的生态安全格局研究表明,生态源地分布在杭州、黄山及衢州等地西部和中部,需求源地主要位于人口密集的东部城区^[35],这与本研究结论一致。为形成有效提升生态福祉的社会-生态安全格局,本研究对供给端和需求端进行长时序动态追踪,构建了从供给演变、廊道传输到需求响应的分析链条,采取近源补充和节点互联的结构优化策略,在一定程度上缓解东部需求源地因本地供给缺失而面临的生态服务枯竭压力。都市圈尺度下的格局研究常面临跨行政区协同治理的共性挑战,跨行政边界尺度下的生态安全格局的建设是解决大范围生态安全问题的关键^[32]。为此,本研究形成“三带三群四区”的优化布局方案。“三带”中北源水系生态涵养带(新安江-千岛湖-分水江)沿线分布有大量生态夹点和障碍点,是跨省生态流传输的关键瓶颈区。2023年,浙皖两省签署《新安江-千岛湖生态环境共同保护合作区建设方案(2023—2027年)》(以下简称《方案》),北源水系生态涵养带正是《方案》实施生态补偿的核心区域。“三群”中西部绿色发展群覆盖安徽黄山、浙江衢州及杭州西部等地,区内生态源地面积大、连通性好,以源地间生态廊道为骨架,将其划分为一个功能协同单元,能够促进打通跨省生态流传输通道。“四区”中生态保护区(黄山、衢州)是钱塘江的北源及南源,生态修复区(杭州)作为下游主要受益区,可通过北源水系生态涵养带和南源水系生态涵养带接收上游生态服务,实现上游保护、下游受益的协同效应。

5 结论

本研究以杭州都市圈为研究对象,基于2004—2024年多源数据,量化5类生态系统服务供需动态,构建社会-生态安全格局。结论表明:杭州都市圈综合生态系统服务供需匹配形成“西盈东缺”的空间格局,经济增长是供需失衡加剧的核心驱动力;生态源地面积大幅缩减,需求源地面积小幅缩减,但源地数量增加、破碎化加剧;生态廊道呈“长而集中”的蛛网状分布,供需廊道呈“短而稀疏”的分散网络;2024年,基于识别的供需节点和优化廊道形成“三带三群四区”的社会-生态安全格局优化布局方案。将来,生态安全格局需动态响应供需演变,在保护西部山区强化生态屏障功能的同时,通过廊道网络优化缓解东部平原的供需失衡压力。

6 参考文献

- [1] GRÊT-REGAMEY A, HUBER S H, HUBER R. Actors' diversity and the resilience of social-ecological systems to global change[J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2(4): 290–297. DOI: 10.1038/s41893-019-0236-z.
- [2] 董元亮, 孙莹莹, 潘铮铮, 等. 基于景观特征和生态系统服务的滁州市乡村景观区划研究[J]. *浙江农林大学学报*, 2025, 42(6): 1285–1295. DONG Yuanliang, SUN Yingying, PAN Chengcheng, et al. Research on rural landscape zoning in Chuzhou City based on landscape characteristics and ecosystem services[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, 42(6): 1285–1295. DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.20250167.
- [3] LIU Wenjun, MA Xiangyi, SUN Qian, et al. Quantification and flow simulation of ecosystem service supply and demand in the Yellow River Delta high-efficiency eco-economic zone[J]. *Land*, 2024, 13(11): 1784. DOI: 10.3390/land13111784.
- [4] 李玲, 王震, 王克勤, 等. 西南高山峡谷区生态系统服务评估及多情景模拟[J]. *浙江农林大学学报*, 2025, 42(4): 813–824. LI Ling, WANG Zhen, WANG Keqin, et al. Ecosystem service assessment and multi-scenario simulation in southwest Alpine canyon region[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, 42(4): 813–824. DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.20240590.
- [5] 刘倩, 周应红, 陈雨萌, 等. 西南地区生境质量供需动态演变及其生态网络构建[J]. *生态学报*, 2026, 46(1): 358–375. LIU Qian, ZHOU Yinghong, CHEN Yumeng, et al. Spatiotemporal dynamics of habitat quality supply and demand and service-oriented ecological network construction in Southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2026, 46(1): 358–375. DOI: 10.20103/j.stxb.202505301353.
- [6] LI Long, HUANG Xianjin, WU Dafang, et al. Construction of ecological security pattern adapting to future land use change in Pearl River Delta, China[J]. *Applied Geography*, 2023, 154: 102946. DOI: 10.1016/j.apgeog.2023.102946.

- [7] 宋桂冠, 张小平. 基于“源地-阻力-廊道”范式的黄河流域甘肃段生态安全格局构建[J]. *水土保持研究*, 2026, **33**(1): 273–283. SONG Guiguan, ZHANG Xiaoping. Construction of ecological security pattern for Gansu section of Yellow River Basin based on “source-resistance-corridor” paradigm[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2026, **33**(1): 273–283. DOI: [10.13869/j.cnki.rswc.2026.01.016](https://doi.org/10.13869/j.cnki.rswc.2026.01.016).
- [8] 庄宝怡, 孙传淳, 植接弟, 等. 基于居民生态福祉提升目标的区域生态网络构建——以粤港澳大湾区为例[J]. *生态学报*, 2025, **45**(24): 12453–12469. ZHUANG Baoyi, SUN Chuanzhun, ZHI Jiedi, *et al.* Regional ecological network construction for ecological well-being: a case study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, **45**(24): 12453–12469. DOI: [10.20103/j.stxb.202505151187](https://doi.org/10.20103/j.stxb.202505151187).
- [9] WU Shiyu, ZHAO Chong, YANG Lin, *et al.* Spatial and temporal evolution analysis of ecological security pattern in Hubei Province based on ecosystem service supply and demand analysis[J]. *Ecological Indicators*, 2024, **162**: 112051. DOI: [10.1016/j.ecolind.2024.112051](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112051).
- [10] 范强, 隋属棋, 张津宁. 基于“供需平衡-敏感性-连通性”的赤峰生态安全格局构建与优化[J]. *环境科学*, 2025, **46**(4): 2450–2462. FAN Qiang, SUI Shuqi, ZHANG Jinning. Construction and optimization of ecological security pattern in Chifeng based on “supply-demand balance-sensitivity-connectivity” [J]. *Environmental Science*, 2025, **46**(4): 2450–2462. DOI: [10.13227/j.hjlx.202403214](https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202403214).
- [11] GAO Xing, GUO Zhongyuan, ZHANG Mengmeng, *et al.* Ecological source identification and ecological security pattern construction from the perspective of ecosystem service supply and demand: a case study of Baiyangdian Basin in China[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2025, **27**(9): 22947–22970. DOI: [10.1007/s10668-024-05302-0](https://doi.org/10.1007/s10668-024-05302-0).
- [12] LIU Huayan, ZHU Jianhua, ZENG Lixiong, *et al.* Identification of urban ecological security pattern based on ecosystem services supply–demand[J]. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2024, **10**: 146. DOI: [10.34133/ehs.0146](https://doi.org/10.34133/ehs.0146).
- [13] 韩月侠, 董斌, 朱若晴, 等. 基于生态系统服务供需视角的安徽省生态安全格局构建[J]. *水土保持学报*, 2025, **39**(5): 322–334. HAN Yuexia, DONG Bin, ZHU Ruoqing, *et al.* Construction of ecological security pattern in Anhui Province from the perspective of ecosystem service supply and demand[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, **39**(5): 322–334. DOI: [10.13870/j.cnki.stbcxb.2025.05.038](https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbcxb.2025.05.038).
- [14] CAI Yuchi, LI Hong, LI Wancong. Optimization of a “social-ecological” system pattern from the perspective of ecosystem service supply and demand: a case study of Jilin Province[J]. *Land*, 2024, **13**(10): 1716. DOI: [10.3390/land13101716](https://doi.org/10.3390/land13101716).
- [15] 梁坤宇, 金晓斌, 张晓琳, 等. 耦合生态系统服务供需的生态安全格局构建——以苏南地区为例[J]. *生态学报*, 2024, **44**(9): 3880–3896. LIANG Kunyu, JIN Xiaobin, ZHANG Xiaolin, *et al.* Construction of ecological security patterns coupling supply and demand of ecosystem services: a case study of Southern Jiangsu Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, **44**(9): 3880–3896. DOI: [10.20103/j.stxb.202307271608](https://doi.org/10.20103/j.stxb.202307271608).
- [16] 李大强, 张飞云, 周红涛, 等. 基于生态系统服务供需的新疆天山北坡城市群生态安全格局构建[J]. *中国环境科学*, 2025, **45**(8): 4706–4714. LI Daqiang, ZHANG Feiyun, ZHOU Hongtao, *et al.* Construction of ecological security pattern of urban agglomeration in the northern slope of Tianshan, Xinjiang based on the supply and demand of ecosystem services[J]. *China Environmental Science*, 2025, **45**(8): 4706–4714. DOI: [10.3969/j.issn.1000-6923.2025.08.055](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6923.2025.08.055).
- [17] ZHANG Yunlong, ZHAO Zhengyuan, FU Bojie, *et al.* Identifying ecological security patterns based on the supply, demand and sensitivity of ecosystem service: a case study in the Yellow River Basin, China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, **315**: 115158. DOI: [10.1016/j.jenvman.2022.115158](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115158).
- [18] 曾兴兰, 陈田田. 基于生态系统服务供需的贵州省生态安全网络构建与优化[J]. *山地学报*, 2023, **41**(4): 493–507. ZENG Xinglan, CHEN Tiantian. Construction and optimization of ecological security network in Guizhou Province of China based on ecosystem service supply and demand[J]. *Mountain Research*, 2023, **41**(4): 493–507. DOI: [10.16089/j.cnki.1008-2786.000765](https://doi.org/10.16089/j.cnki.1008-2786.000765).
- [19] 柯钦华, 周俏薇, 庄宝怡, 等. 基于生态系统服务供需平衡的粤港澳大湾区生态安全格局构建[J]. *生态学报*, 2024, **44**(5): 1765–1779. KE Qinhua, ZHOU Qiaowei, ZHUANG Baoyi, *et al.* Construction of ecological security pattern in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on the balance of ecosystem services supply and demand[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, **44**(5): 1765–1779. DOI: [10.20103/j.stxb.202305221071](https://doi.org/10.20103/j.stxb.202305221071).
- [20] YAN Fapeng, SHANGGUAN Wei, ZHANG Jing, *et al.* Depth-to-bedrock map of China at a spatial resolution of 100 meters[J]. *Scientific Data*, 2020, **7**: 2. DOI: [10.1038/s41597-019-0345-6](https://doi.org/10.1038/s41597-019-0345-6).

- [21] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends* [M]. Washington, D. C. : Island Press, 2005.
- [22] 陈绎安, 胡宝群, 汤江龙, 等. 生态系统服务供需权衡下南昌市生态安全格局演变及其影响因素分析[J]. *环境科学*, 2025, **46**(11): 7316–7328. CHEN Yian, HU Baoqun, TANG Jianglong, *et al.* Analysis of evolution and influencing factors of ecological security patterns in Nanchang City under the trade-off between ecosystem service supply and demand[J]. *Environmental Science*, 2025, **46**(11): 7316–7328. DOI: [10.13227/j.hjxx.202410013](https://doi.org/10.13227/j.hjxx.202410013).
- [23] 张艺玫, 张淑怡, 朱泓恺, 等. 基于多尺度生态系统服务供需的大都市区生态安全格局构建与优化[J]. *生态学报*, 2024, **44**(21): 9596–9609. ZHANG Yimin, ZHANG Shuyi, ZHU Hongkai, *et al.* Construction and optimization of the ecological security pattern in metropolitan areas based on the supply and demand of ecosystem services at multiple scales[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, **44**(21): 9596–9609. DOI: [10.20103/j.stxb.202310182269](https://doi.org/10.20103/j.stxb.202310182269).
- [24] 邱大鹅, 张军以, 杨晓雪. 基于不同需求层次生态服务供需的四川盆地生态安全格局构建[J]. *中国环境科学*, 2025, **45**(6): 3343–3358. QIU Da'e, ZHANG Junyi, YANG Xiaoxue. Construction of ecological security pattern in Sichuan Basin based on the supply and demand of ecological services at different demand levels[J]. *China Environmental Science*, 2025, **45**(6): 3343–3358. DOI: [10.3969/j.issn.1000-6923.2025.06.040](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6923.2025.06.040).
- [25] JIANG Hong, PENG Jian, XU Dongmei, *et al.* Constructing ecological security patterns with differentiated management intensity based on multifunctional landscape identification and multi-criteria decision-making[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2024, **50**: e02862. DOI: [10.1016/j.gecco.2024.e02862](https://doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e02862).
- [26] JIANG Hong, PENG Jian, DONG Jianquan, *et al.* Linking ecological background and demand to identify ecological security patterns across the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area in China[J]. *Landscape Ecology*, 2021, **36**(7): 2135–2150. DOI: [10.1007/s10980-021-01234-6](https://doi.org/10.1007/s10980-021-01234-6).
- [27] AVON C, BERGÈS L. Prioritization of habitat patches for landscape connectivity conservation differs between least-cost and resistance distances[J]. *Landscape Ecology*, 2016, **31**(7): 1551–1565. DOI: [10.1007/s10980-015-0336-8](https://doi.org/10.1007/s10980-015-0336-8).
- [28] 韩磊, 胡紫洁, 康宏亮, 等. 基于生态系统服务供需的社会-生态安全格局构建—以黄土丘陵沟壑区为例[J]. *生态学报*, 2026, **46**(8): 3969–3984. HAN Lei, HU Zijie, KANG Hongliang, *et al.* Construction of socio-ecological security pattern based on the supply and demand of ecosystem services: a case study of the Loess hilly and gully region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2026, **46**(8): 3969–3984. DOI: [10.20103/j.stxb.202504080813](https://doi.org/10.20103/j.stxb.202504080813).
- [29] PENG Jian, TIAN Lu, LIU Yanxu, *et al.* Ecosystem services response to urbanization in metropolitan areas: thresholds identification[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **607–608**: 706–714. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2017.06.218](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.218).
- [30] MCRAE B H, HALL S A, BEIER P, *et al.* Where to restore ecological connectivity? detecting barriers and quantifying restoration benefits[J]. *PLoS One*, 2012, **7**(12): e52604. DOI: [10.1371/journal.pone.0052604](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0052604).
- [31] WANG Xiaobao, ZHAO Xiaoqing, RAN Yuju, *et al.* Sustainable management of plateau mountainous urban agglomerations based on the ecosystem services supply-demand balance: application of scale and threshold effects[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2026, **556**: 148141. DOI: [10.1016/j.jclepro.2026.148141](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2026.148141).
- [32] JIA Qiqi, JIAO Limin, LIAN Xihong, *et al.* Linking supply-demand balance of ecosystem services to identify ecological security patterns in urban agglomerations[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2023, **92**: 104497. DOI: [10.1016/j.scs.2023.104497](https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104497).
- [33] WANG Xinmei, QIU Xiaoling, WANG Zeni, *et al.* Construction of a social ecological security pattern based on the supply and demand of ecosystem services[J]. *Journal for Nature Conservation*, 2025, **86**: 126962. DOI: [10.1016/j.jnc.2025.126962](https://doi.org/10.1016/j.jnc.2025.126962).
- [34] 叶樊妮, 方信卓, 龚碧凯. 生态系统服务供需匹配视角下陕甘宁地区生态安全格局[J]. *干旱区研究*, 2026, **43**(1): 188–199. YE Fanni, FANG Xinzhuo, GONG Bikai. Ecological security patterns in the Shaanxi-Gansu-Ningxia region from the perspective of matching the supply and demand of ecosystem services[J]. *Arid Zone Research*, 2026, **43**(1): 188–199. DOI: [10.13866/j.azr.2026.01.17](https://doi.org/10.13866/j.azr.2026.01.17).
- [35] 黄晓怡. 基于生态系统服务供需的长三角地区生态安全格局研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2024. HUANG Xiaoyi. *Ecological Security Pattern of the Yangtze River Delta Based on Ecosystem Service Supply and Demand* [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2024. DOI: [10.27312/d.cnki.gshsu.2024.001338](https://doi.org/10.27312/d.cnki.gshsu.2024.001338).