

DOI: 10.20103/j.stxb.202410062416

赵依婷, 徐建刚, 沈舟, 徐雯. 基于生态系统服务供需与敏感性分析的城郊地区生态安全格局构建. 生态学报, 2025, 45(18): - .

Zhao Y T, Xu J G, Shen Z, Xu W. Construction of ecological security pattern in peri-urban areas based on ecosystem service supply and demand and sensitivity analysis. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(18): - .

基于生态系统服务供需与敏感性分析的城郊地区生态安全格局构建

赵依婷¹, 徐建刚^{1,*}, 沈舟¹, 徐雯²

¹ 南京大学建筑与城市规划学院, 南京 210008

² 南京市规划和自然资源局六合分局, 南京 211500

摘要:生态安全格局的构建是维持区域生态系统服务功能稳定的有效途径,对促进区域可持续发展和保障人类福祉具有重要意义。然而,现有研究较少关注适用于城郊地区的生态安全格局构建方法,尤其是在生态系统服务供需失衡与生态敏感化的背景下,忽视了生态源地识别中对生态保护需求与人居环境质量的统筹考虑。以南京市六合区为例,从生态系统服务供需与敏感性分析两方面入手,运用 InVEST 模型和生态系统服务供需比(ESDR)量化分析方法,提取了具有高生态系统服务供给水平和潜力的生态源地;从生态风险与外部干扰两个维度综合多因子指标以表征生态敏感性水平,识别高敏感性且具有完整生态功能的景观要素作为生态源地。在源地耦合的基础上,构建生态阻力面,利用最小累积阻力模型和电路理论提取生态廊道、生态夹点和障碍点,形成了针对城郊地区的生态安全格局构建体系。结果表明,在城郊地区的生态源地提取过程中,未充分考虑生态敏感性指标将导致忽视 59.50% 的生态要素,这些要素因高度分散的干扰源而表现出敏感性,但依然保持完整的生态功能。研究区域内共识别出 15 个生态源地,总面积为 267.99km²,占研究区域的 20.59%。其分布特征为“中西部多、东部少”,主要的土地利用方式为林地与耕地。同时,30 条生态廊道密集分布于东部和北部,短距离廊道主要位于北部和西部,中长距离廊道则分布于东部,生态夹点主要集中于研究区域北部、中部和东部的中长距离廊道;生态障碍点主要分布于南部的长距离廊道。据此,本研究提出了南京市六合区“五区四廊道”生态保护与修复格局的规划建议,并为生态安全格局构建理论与方法体系在城郊地区的应用提供了新思路。

关键词:生态系统服务供需;敏感性分析;城郊地区;生态安全格局;南京市六合区

Construction of ecological security pattern in peri-urban areas based on ecosystem service supply and demand and sensitivity analysis

ZHAO Yiting¹, XU Jiangang^{1,*}, SHEN Zhou¹, XU Wen²

¹ School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing 210008, China

² Luhe Branch, Nanjing Municipal Bureau of Planning and Natural Resources, Nanjing 211500, China

Abstract: The construction of ecological security patterns constitutes an effective approach to maintaining regional ecosystem service stability, which is of great significance to promote regional sustainable development and ensure human well-being. However, the existing research pays less attention to the construction method of ecological security pattern suitable for suburban areas, especially in the context of imbalance between supply and demand of ecosystem services and ecological sensitivity, ignoring the comprehensive consideration of ecological protection needs and human settlements quality in the identification of ecological sources. Taking Liuhe District of Nanjing as an example, from the aspects of supply and

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52178043)

收稿日期:2024-10-06; **网络出版日期:**2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xjgl29@sina.com

demand of ecosystem services and sensitivity analysis, the InVEST model and the Ecosystem Service Demand Ratio (ESDR) quantitative analysis method were used to extract the ecological sources with high level and potential of ecosystem service supply. Multi-factor indicators are integrated from the two dimensions of ecological risk and external interference to characterize the level of ecological sensitivity, and landscape elements with high sensitivity but complete ecological functions are identified as ecological sources. On the basis of source coupling, the ecological resistance surface is constructed, and the ecological corridors, ecological pinch points and obstacle points are extracted by using the minimum cumulative resistance model and circuit theory, and the ecological security pattern construction system for suburban areas is formed. The results show that in the process of extracting ecological sources in suburban areas, insufficient integration of ecological sensitivity indicators would omit 59.50% of functional ecological elements. These elements show sensitivity due to highly dispersed interference sources, but still maintain complete ecological functions. A total of 15 ecological sources were identified in the study area, with a total area of 267.99km², accounting for 20.59% of the study area. Spatial distribution exhibits “midwest-dense, east-sparse” clustering, and the main land use patterns are forest land and cultivated land. At the same time, 30 ecological corridors are densely distributed in the east and north. The short-distance corridors are mainly located in the north and west, while the medium-long-distance corridors are distributed in the east. The ecological pinch points are mainly concentrated in the medium-long-distance corridors in the north, middle and east of the study area. The ecological barrier points are mainly distributed in the long-distance corridors in the south. Based on this, this study puts forward the proposes an “Five Districts and Four Corridors” ecological restoration framework in Liuhe District of Nanjing, and provides a new idea for the application of the ecological security pattern planning methodology system in suburban areas.

Key Words: supply and demand of ecosystem services; sensitivity analysis; suburban areas; ecological security pattern; Liuhe District; Nanjing City

快速城市化导致的建设用地扩张深刻改变了生态系统结构与功能^[1],进一步削弱了其服务供给能力^[2]。与此同时,随着人类对生态系统服务需求的增长,区域生态敏感化与脆弱化等问题日益凸显,导致生态系统服务供需出现失衡^[3-4],也威胁到生态安全和人类的可持续发展。生态安全格局是维持生态系统健康与完整性的关键^[5],因此针对区域典型生态环境问题,识别并保护关键生态要素^[6],是实现可持续发展和提升人类福祉的重要手段^[7-8]。因此,在特定地区,构建符合其景观生态特征与人居环境需求的生态安全格局具有重要意义,能够提高这一空间策略在维持生态系统稳定性方面的实践有效性^[9],为协调人与自然关系、促进地区可持续发展提供有益指导^[10]。

目前,生态安全格局构建中“源地识别-阻力面构建-廊道提取”的基本范式^[11],已为学界广泛认可。生态源地作为生态过程流动的起点和终点,承载着维持生物多样性、碳存储与固定、土壤保持等主要生态系统功能,构成了生态安全格局的核心要素^[12]。因此,准确识别景观要素作为生态源地是生态安全格局构建的首要步骤,也是当前研究的热点话题。许多学者从生态源地的功能性与结构性特征出发,拓展了包括生态系统服务重要性^[13]、景观连通性^[14-15]和生态敏感性^[16]等多维度评估指标,并借助形态学空间格局分析^[17]与探索性空间数据分析^[18]等手段丰富了科学识别生态源地的方法。在此基础上,结合社会-生态复合系统中人类需求与自然保护之间的现实矛盾,将生态系统服务供需关系量化纳入已有研究范式,已成为新的发展趋势^[19]。例如,已有研究多聚焦高度城市化地区^[20-21],重点关注城市群特征及其对生态系统服务的高需求^[22],考虑了资源约束趋紧、生态环境压力增大等问题,通过量化生态系统服务供与需的水平识别生态源地。例如,Jiang等^[23]以粤港澳大湾区为例,将具备水源涵养、碳存储及游憩等功能的景观斑块识别为生态源地。现有成果虽为城市群尺度上的生态安全格局提供了一种有效提升生态系统保护可持续性的方法,但侧重于从生态系统服务供需整合的视角进行分析。然而,对于城郊地区而言,研究对明显破碎化的人造景观及干扰源的分散性考虑不足,尤其未将生态系统受外部干扰的敏感性特征纳入研究框架,忽视了大量可利用景观资源或潜在生态

资源要素所带来的生态效益。作为城乡梯度的一部分,城郊地区的生态景观是人与自然连接并提供多种生态系统服务的载体^[24],与建成环境内的人造绿色景观相比,具有更广泛的分布和更优的生态系统服务功能^[25]。然而,较高的景观破碎化和人类活动使其生态系统更容易受到干扰,这也限制了生态安全格局构建在人类活动强烈但仍保留较多自然生态资源地区即城郊地区的完整性与有效性。因此,城郊地区需聚焦于景观破碎化与生态脆弱化的问题,兼顾人居环境质量提升与生态保护需求,在此基础上构建一种融合生态关键要素与完整生态功能的生态源地识别方法。

研究以南京市六合区为例,探讨仅考虑生态系统服务供需测度的生态源地识别方法,会在多大程度上忽视高度分散干扰源导致的生态要素敏感化但生态功能完整的生态源地。研究区兼具城乡特征,保留完整自然生态景观的同时,面临城市化带来的生态功能退化等压力,需合理规划与管理以实现生态安全与可持续发展。为此,本文从生态系统服务供需与敏感性分析结合的角度提出针对城郊地区的生态安全格局框架:通过量化生态系统供需来表征生态需求与人类活动的相互作用,并利用生态敏感性分析评估生态系统受到影响的敏感程度,旨在提升生态安全格局这一空间策略在应对城郊地区典型生态问题时的适用性,以期拓展生态安全格局构建与国土空间生态保护的理论与方法体系。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

南京市六合区位于南京市北部,土地总面积为 1295.27km²(图 1)。该区地势北高南低,北部为丘陵山岗,中南部为河谷平原及岗地。属北亚热带季风温湿气候区,年均气温约 16℃左右,年均降雨量约 590mm 左右。作为南京市的城郊地区,六合区既有城市现代化设施和服务,又保留了丰富的自然景观和生态资源,如农田、森林和湿地,为城市居民提供了良好的生活环境和休闲场所。随着南京市快速发展,六合区作为城郊地区和国家级江北新区的融合发展区,面临着发展与保护的双重挑战。

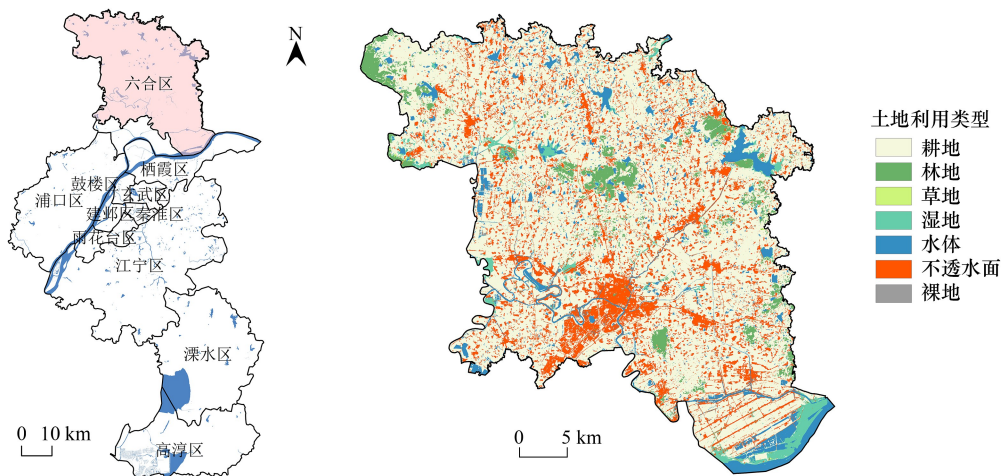


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

1.2 数据来源

本文所用数据涵盖矢量数据、栅格数据及统计数据,涉及土地利用、净初级生产力、NDVI、土壤类型等多个指标(表 1)。为提升数据的可比性和分析效率,所有矢量及统计数据均已进行栅格化处理,统一的空间分辨率设定为 100m×100m,投影坐标系则采用 CGCS2000_3_Degree_GK_CM_117E。

表 1 数据来源和空间尺度
Table 1 Data sources and spatial scales

数据类型 Data type	年份 Year	空间尺度 Spatial scale	来源 Source
土地利用/覆被数据 Land use/cover	2020	10m	基于噪声标签学习的跨分辨率国家尺度土地覆被制图——以中国为例 ^[26]
净初级生产力 NPP Net primary production	2020	500m	MOD17A3HGF
NDVI Normalized Difference Vegetation Index	2020	250m	MODIS13Q1
土壤类型 Soil type	—	1:1000000	资源环境数据云平台 (https://www.resdc.cn/)
年降水量风速 Annual precipitation wind speed	1991—2020	1km	国家地球系统科学数据中心 (https://www.geodata.cn/)
蒸散量 Evapotranspiration	2020	500m	MOD16A3GF
DEM Digital Elevation Model	—	12.5m	NASA 地球科学数据网站 (https://nasadaacs.eos.nasa.gov/)
路网 Road network	2018	1:100000	Open-Street-Map (https://www.openstreetmap.org/)
网格人口数据 Grid population data	2020	100m	World Pop (www.worldpop.org)
夜间灯光数据 Night Light Data	2020	130m	地球观测组 (EOG) (http://www.hbeos.org.cn/)
人口数据 Population data	2020	—	《六合统计年鉴(2021)》
水消耗 Water consumption	2020	—	《江苏省水资源公报(2021)》
化石能源消耗 Fossil energy consumption	2020	—	《中国能源统计年鉴(2021)》
农业生产资料消耗 Consumption of agricultural means of production	2020	—	《中国农业年鉴(2021)》

2 研究方法

针对城郊地区生态系统服务供需失衡显著,以及景观破碎化与人类活动干扰耦合造成生态脆弱化与敏感化的问题,本文提出了一种耦合生态系统服务供需与生态敏感性分析的生态安全格局构建框架,利用 InVEST 模型、供需比量化、多因子综合分析等方法,拓展了生态源地识别方法与生态安全格局的理论方法体系。其中,量化了包括产水量、土壤保持、碳固定、雨洪调节、生境质量和休闲游憩在内的生态系统服务供给及其供需比,以提取具有较高生态系统供给水平和潜力的生态源地。在此基础上,从生态风险与外部干扰两个维度综合多因子指标以表征生态敏感性水平,识别高敏感性但具有完整生态功能的景观要素作为生态源地。综合以上源地识别结果,以土地利用类型、地形和夜间灯光强度作为阻力因子构建生态阻力面,并利用最小累积阻力模型和电路理论等方法,将生态廊道、生态夹点和障碍点等要素纳入研究框架(图 2)。

2.1 生态源地识别

2.1.1 生态系统服务供需量化

基于城郊地区的生态景观特征,本研究选取六类典型生态系统服务作为评估对象,包括产水量^[27—28](WY)、土壤保持^[29](SC)、碳固定^[30](CS)、雨洪调节^[31](RF)、生境质量^[32](HQ)和休闲游憩^[33—35](RL)(表 2)。具体而言,南京市六合区建成区呈现集聚特征,水资源消耗呈现集聚效应,而生态用地则呈现破碎化分布格局,区域碳固定服务需求显著提升。同时,作为南京市重要备用水源的金牛山水库,其周边区域的生态安全需高度关注,尤其是在雨洪调节、土壤保持以及生境质量等服务的敏感性方面。此外,随着居民对精神文化

需求的不断增长,区域内休闲绿地的功能也面临新的需求。

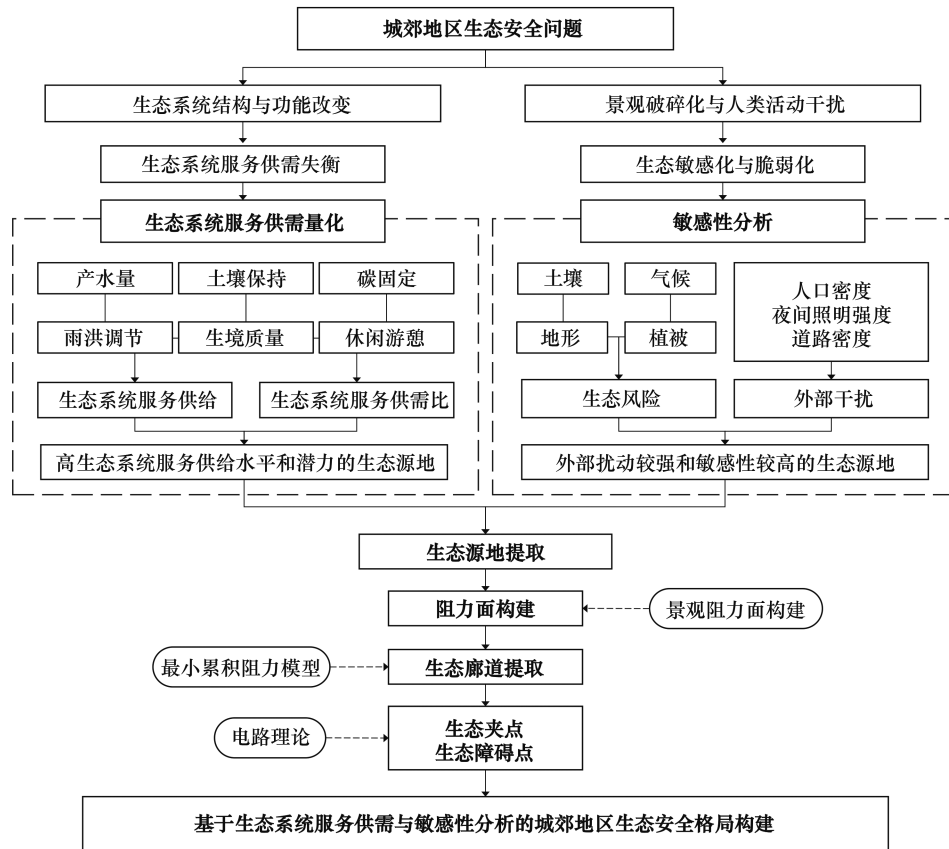


图2 研究框架

Fig.2 Research framework

表2 生态系统服务供需评估方法与计算过程

Table 2 Methodology and calculation process for assessing the supply and demand of ecosystem services

生态系统服务 Ecosystem services	原理与方法 Principles and methods	计算过程 Calculation process
产水量 Water Yield (WY)	供给 InVEST 模型 Annual water yield 模块	$WY_{ij}^S = \left(1 - \frac{AET_{ij}}{P_i}\right) \times P_i$ $\frac{AET_{ij}}{P_i} = \frac{1 + \omega \times R_{ij}}{1 + \omega \times R_{ij} + 1/R_{ij}}$ 式中, WY_{ij}^S 为产水量供给 (m^3); AET_{ij} 为年实际蒸散量 (mm); P_i 为 1991—2020 年均降水量 (mm); R_{ij} 为干旱指数; ω 为植被可利用含水量。
	需求 水消耗量	$WY_i^D = (W_{dom} + W_{agr} + W_{eco} + W_{oth}) \times \frac{Pop_i}{Pop}$ 式中, WY_i^D 为产水量需求 (m^3); W_{dom}、W_{agr}、W_{eco}、W_{oth} 分别为工业、生活、农业、生态和其他用水; Pop 为总人口; Pop_i 为栅格人口。
土壤保持 Soil Conservation (SC)	供给 InVEST 模型 Sediment Delivery Ratio 模块	$SC_i^S = R_i \times K_i \times LS_i \times (1 - C_i \times P_i)$ 式中, SC_i^S 为土壤保持供给 (t/hm^2); R_i 为降雨侵蚀力, K_i 为土壤侵蚀力, LS_i 为坡长因子; C_i 和 P_i 为植被覆盖度因子和管理措施因子; P_i 定义为 1。
	需求	$SC_i^D = R_i \times K_i \times LS_i \times C_i \times P_i$ 式中, SC_i^D 为土壤保持需求 (t/hm^2)。
碳固定 Carbon Sequestration (CS)	供给 植被碳固定能力	$CS_i^S = NPP_i \times Area$ 式中, CS_i^S 为碳固定供给; NPP_i 为净初级生产力; $Area$ 为栅格面积。

续表

生态系统服务 Ecosystem services		原理与方法 Principles and methods	计算过程 Calculation process
	需求	农业生产和化石能源的碳排放	$CS_i^D = (C_a + C_f) \times \frac{Pop_i}{Pop}$ $C_a = \sum C_j = \sum (\omega_j \times \mu_j)$ $C_f = \sum C_t = \sum (\varepsilon_t \times \theta_t \times \varphi_t)$ 式中, CS_i^D 为碳固定需求, C_a 和 C_f 为农业和化石能源碳排放量; C_j、ω_j、μ_j 为农业碳排放量、消耗量及换算系数^[36]; C_t、ε_t、θ_t 和 φ_t 分别为化石能源碳排放量、消耗量、转换系数及碳排放系数, 参数 θ 来源于《中国能源统计年鉴(2021)》; 参数 φ 来源于《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》。
雨洪调节 (RF) Rain Flood Regulation	供给	InVEST 模型 Urban flood risk mitigation 模块	$RF_i = \left(1 - \frac{Q_i}{P}\right) \times P \times Area \times 10^{-3}$ $Q_i = \begin{cases} (P - \lambda S_{max,i})^2 (P > \lambda S_{max,i}) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases}$ $S_{max,i} = \frac{25400}{CN_i} - 254$ 式中, RF_i 为雨洪调节供给 (m^3); Q_i 为径流量; P 为暴雨深度; $S_{max,i}$ 为潜在滞留量; $\lambda S_{max,i}$ 为引发径流所需的降雨深度; CN_i 为径流曲线数值^[37]。年降雨径流 Q_i。
生境质量 (HQ) Habitat Quality	需求	洪涝灾害脆弱性	
	供给	InVEST 模型 habitat Quality 模块	$HQ_S = H_j \times \left[1 - \left(\frac{D_{ij}^z}{D_{ij}^z + k^z}\right)\right]$ 式中, HQ_S 为生境质量供给; H_j 为生境适宜性; D_{ij} 为生境威胁等级; k 为半饱和和常数。
	需求	人为干扰	$HQ_D = \frac{D_i - D_{min}}{D_{max} + D_{min}}$ $D_i = C_i \times \log P_i \times \log E_i$ 式中, HQ_D 为生境质量需求, D_i 为生境质量需求程度; C_i、P_i、E_i 分别为人工地表面积、人口密度和 GDP。
休闲游憩 (RL) Recreational Leisure	供给	生态系统服务价值	$RL_i^S = Q_i \times (RA_i \times Landscape_i \times Terrain_i)$ 式中, RL_i^S 为休闲游憩供给; Q_i 为生境质量; RA_i 为可达性因子; $Landscape_i$ 为景观因子; $Terrain_i$ 地形因子^[34]。
	需求	人均绿地需求	$RL_i^D = PGD \times \frac{Pop_i}{Pop}$ 式中, RL_i^D 为休闲游憩需求; PGD 为人均公共绿地面积; $14.78 m^2$。
生态系统服务供需比 (ESDR) Ecosystem Service Supply-Demand Ratio	供需比 ^[38]		$ESDR = \frac{S - D}{(S_{max} - D_{max})}$ 式中, S 和 D 为生态系统服务供给和需求, S_{max} 和 D_{max} 为最大值。若 $ESDR > 0$ 表示供大于需, 若 $ESDR = 0$ 表示供需平衡, 若 $ESDR < 0$ 表示供不应求。
	综合供需比		$CESDR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ESDR_i$ 式中, $CESDR$ 为生态系统服务综合供需比; n 为生态系统服务数量, 本研究中 $n = 6$; $ESDR_i$ 表示第 i 项生态系统服务的供需比。

生态源地在提供高质量生态系统服务、防止生态退化以及维护景观格局完整性方面具有关键作用^[39]。本文借鉴了 Jiang 等^[23]的研究方法,通过叠加分析生态系统服务的综合供给与供需比的分析结果,识别城郊地区生态源地。该方法确保所识别的生态源地不仅具备高质量的生态功能,还能满足人类活动对生态系统服务的需求,从而兼具生态功能性与可持续性。具体而言,首先采用分位数法^[28]将生态系统服务的供给与供需比划分为五个等级,提取前 20%最重要的区域,随后叠加分析获取两部分区域的交集,确定为生态源地,以识别区域关键生态要素。

2.1.2 生态敏感性分析

生态敏感性反映了生态系统对自然环境变化及人为干扰的响应程度,揭示了区域生态环境风险发生的可能性及其脆弱性特征^[39]。研究综合评估多个生态敏感因子,包括地形、土壤、气候、植被覆盖及人类活动强度^[40—41],采用层次分析法确定各敏感因子的权重(表 3),从而得出综合评价结果。基于此,提取生态敏感性区域的前 40%,剔除非生态用地,并与初始识别的生态源地及面积超过 10km² 的重要水域进行空间叠加分析,最终形成优化后的生态源地分布格局。

表 3 生态敏感性因子及权重
Table 3 Ecological sensitivity factors and weights

指标层 Index layer	因素组 Factor group	因素组权重 Factor group weight	因素 Factor	因素权重 Factor weight
生态风险 Ecological risks	地形	0.32	DEM	0.41
			坡度	0.59
	土壤	0.28	土壤侵蚀力	1
			年降水量	0.59
	气候	0.13	平均风速	0.41
外部干扰 External interference	植被	0.17	植被覆盖率	1
	干扰类型	0.10	人口密度	0.41
			夜间照明强度	0.32
			道路密度	0.27

2.2 生态阻力面构建

生态阻力面作为衡量景观异质性对生态过程流动影响的重要工具,能够反映物种在景观内部迁移的难易程度及生态过程的空间阻力特征^[42]。基于最小累积阻力模型,计算生态源地之间的最小阻力路径,利用 ArcGIS 筛选土地利用类型、地形因子及夜间灯光强度作为关键阻力因子^[40,43—44],构建生态阻力面^[39]:

$$R_i = Land_i \times Terrain_i \times NL_i$$

式中, R_i 为生态阻力; $Land_i$ 为生态阻力系数(耕地 30,林地 5,草地 20,水体 10,建设用地 100,未利用地 50); $Terrain_i$ 为归一化地形修正系数; NL_i 为归一化夜间光照强度。

2.3 生态安全格局构建

电路理论借鉴了物理学电子在电路中随机游走的特性,以模拟生物迁移在异质景观中的迁移过程^[45]。这一理论可以与电子在电路中的随机行走相类比,综合考虑所有可能路径,从而预测种群扩散的潜在性^[46]。研究运用最小累积阻力模型与电路理论,识别生态廊道和生态节点,进而构建生态安全格局。具体而言,在 ArcGIS 10.8 中应用 Linkage Mapper 3.1.0,利用 Build Network and Map Linkages 工具计算最小成本路径,确定生态廊道^[47]。同时,运用 Pinchpoint Mapper 工具识别具有高电流密度的关键节点,即生态夹点。在夹点的确定过程中,采用电路理论中的截断宽度来限制廊道范围,范围从 1000—10000m 不等,最终选定 1000m 作为步长。利用 Barrier Mapper 工具计算生态障碍点,将移动窗口搜索半径设置为 100m。区域得分越高,表明该区域的修复将有效提升廊道连通性^[48]。

3 结果

3.1 生态系统服务供需特征

生态系统服务的综合供给呈现出“南北高、中部低”的空间分布(图 3)。中部地区的低供给主要是由于建设用地的广泛分布、植被稀疏以及生态基础薄弱,而南北部则因水体和林地丰富而表现出高供给特征。其中,产水量供给受降水和蒸散发等因素的影响,呈现“南高北低”的特征。土壤保持、碳固定和雨洪调节的高供给区主要集中在水域和森林公园。生境质量供给由于南北部植被覆盖率高且水域广泛,而中部生态脆弱,

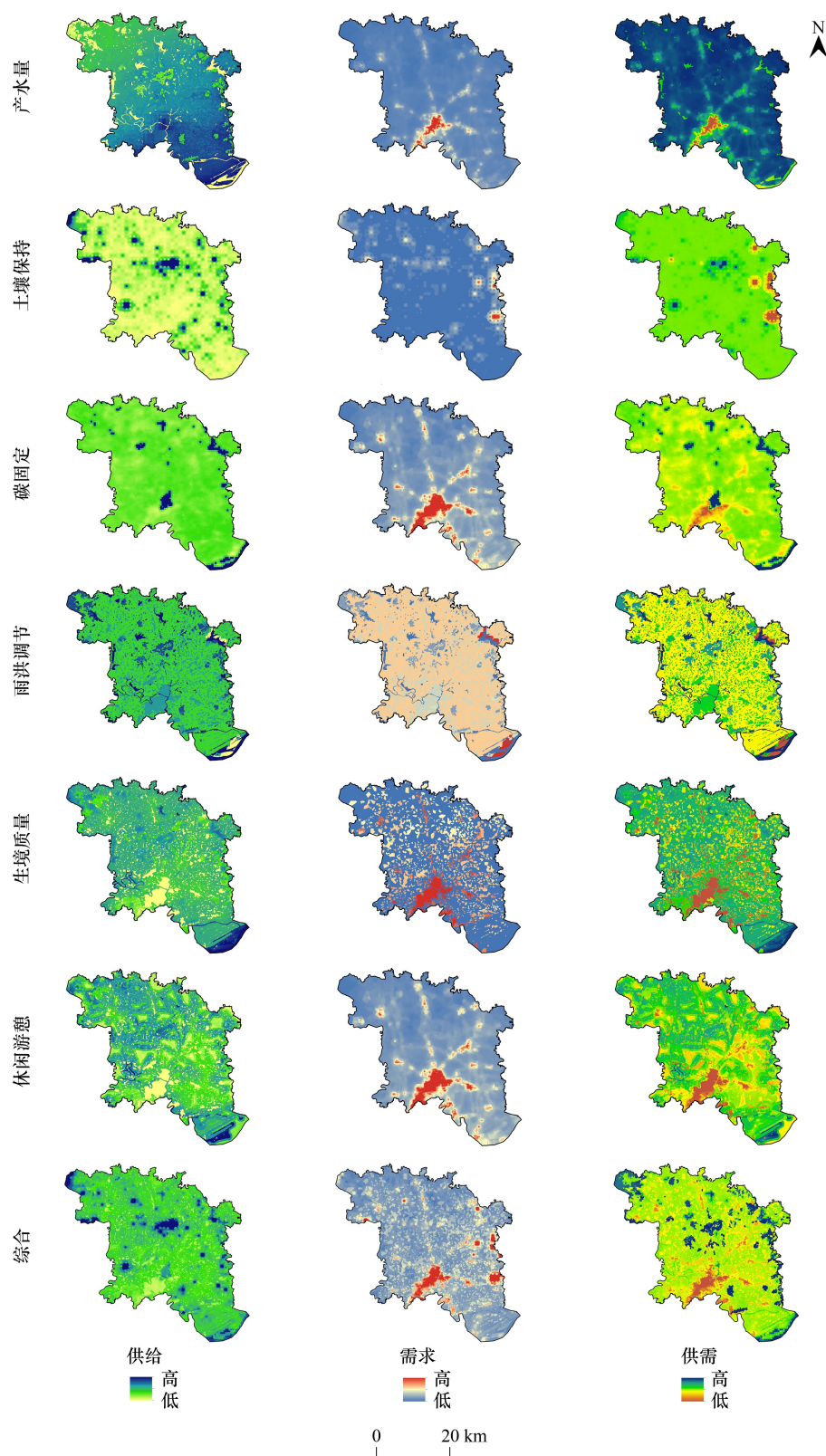


图3 生态系统服务供需空间分布格局

Fig.3 Spatial distribution pattern of supply and demand of ecosystem services

因此表现出“南北高、中部低”的格局。休闲游憩供给沿主要交通干线分布,整体上呈现“南北高、中部低”的特征,这与南北部丰富的林地和水体密切相关。生态系统服务的综合需求则显示出“西南高、东北低”的分布

(图 3),这与人口密度呈正相关,并且高需求区域主要集中在西南部的建设用地。产水量、碳固定、生境质量和休闲游憩服务的需求均呈现“西南高、东北低”的趋势,主要受人口密度、经济发展和土地利用的影响。土壤保持服务的高需求区集中在东部,这主要是由于该区域的生态敏感性较高。雨洪调节的高需求区位于东北部,与水库周围的水网系统有关,暴雨期间流域内的径流量增大,增加了洪涝灾害的风险。

生态系统服务的综合供需比呈现出“北部高、西南低”的格局(图 3)。北部地区的人口密度低且植被覆盖率高,形成了高供给与低需求的良性循环,综合供需比较高,能有效满足生态需求并实现可持续供给。相比之下,西南部因建设用地比例高且人口密集,综合供需比偏低,难以应对生态需求。具体而言,产水量、生境质量和休闲游憩服务的供需比呈现出“南低北高”的格局,与建设用地的分布一致。土壤保持的供需比则表现为“西高东低”。碳固定的供需比在水体和林地区域较高,而南部的建设用地则相对不足。雨洪调节的供需比普遍较低,除了部分林地外,缺乏明显的高值区域,这使得该区域有一定洪涝风险。

通过叠加分析生态系统服务的综合供给与综合供需比,提取了具有高生态系统服务供给水平和潜力的初始生态源地。初始生态源地的总面积为 133.44km^2 ,占研究区域的 10.25%,其分布相对分散,主要集中在南部和东北部区域(图 4)。

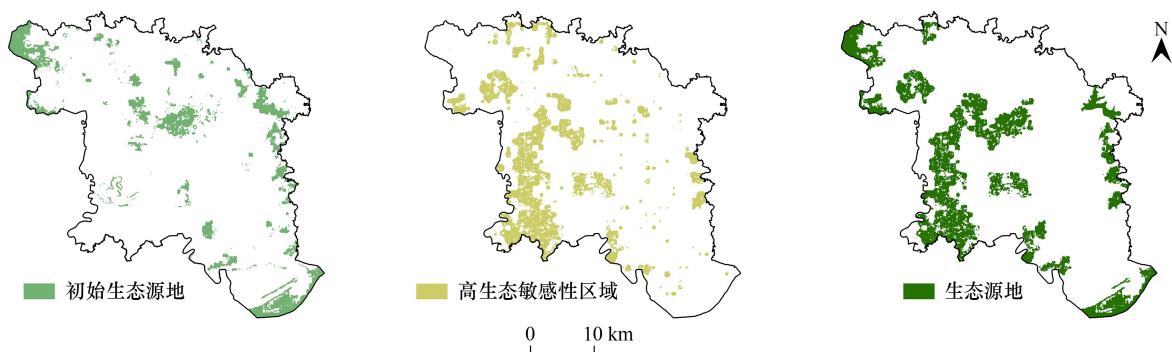


图 4 初始生态源地、高生态敏感性区域及生态源地空间分布

Fig.4 Initial ecological source, high ecological sensitivity area and spatial distribution of ecological source

3.2 生态敏感性分析

高生态敏感性区域主要集中在研究区西部的城市化地区,呈现出“西南部多、东北部少”的分布格局(图 4)。南京市六合区共识别出 15 个生态源地斑块,总面积为 267.99km^2 ,占研究区域的 20.59%。其中,耕地类型占 57.17%,林地类型占 15.87%,地貌特征以平原和丘陵为主。生态源地的空间分布显著不均,83.66%的生态源地集中在研究区中西部,形成了“中西部多、东部少”的分布结构。仅考虑生态系统服务供需测度的生态源地识别方法所得到的生态源地占最终生态源地的 40.50%,这表明如果在城郊地区的生态源地提取中未考虑生态敏感性指标,将会忽视 59.50%的生态源地,这些区域由于高度分散的干扰源而导致生态要素敏感化,但仍保留了完整的生态功能。

3.3 生态安全格局构建

研究提取了 30 条总长 193.672km 的生态廊道,其空间分布呈现显著层级特征。短距离廊道($<8\text{km}$)密集分布于北部及西部,其中北部边界廊道整合止马岭、大泉水库与大河桥水库等生态节点,形成闭环式生态网络;中长距离廊道($>8\text{km}$)则聚集于东部,以金牛山水库-冶山生态轴为核心,通过伞状结构串联山湖水库、凤凰山公园至兴隆洲等节点,构建生态联通体系(图 5)。在提取生态廊道的基础上,进一步识别出 25 处关键生态夹点(3.98km^2)及 3 处生态障碍点(2.71km^2)。生态夹点集中分布于北部、中部及东部廊道交汇处,其形成与生态源地空间隔离导致的生物迁移路径压缩密切相关;生态障碍点则主要在南部穿城廊道,尤其是连接中心城区与公园绿地的区段。此类廊道因贯穿高密度建成区及高速公路,叠加景观破碎化与人为干扰影响,形

成显著的阻隔。该空间分异特征揭示了城郊生态网络建设中需差异化实施廊道修复,东部需强化结构的完整性,南部则应重点突破建成区生态阻隔。

综合分析结果,构建了包含 15 个生态源地、30 条廊道网络、25 个生态夹点及 3 处障碍节点的生态安全格局体系。基于夹点分布特征划定了生态保护区,结合障碍点空间属性确定了生态修复区,最终形成六合区“五区四廊”的生态保护与修复格局(图 5)。四个生态保护区位于廊道交汇处,包括止马岭-大泉水库生态保护区、山湖水库-平山生态保护区、金牛山水库-冶山生态轴及兴隆洲湿地生态保护区。凤凰山公园-滁河滨河公园-龙池湖公园构成了生态修复区,通过廊道串联实现受损斑块功能再生。四条廊道通过夹点强化与障碍点疏解,串联保护区与修复区,形成“源地-廊道-夹点”三级联动的生态空间协同,构筑了环绕六合城区的生态安全屏障。

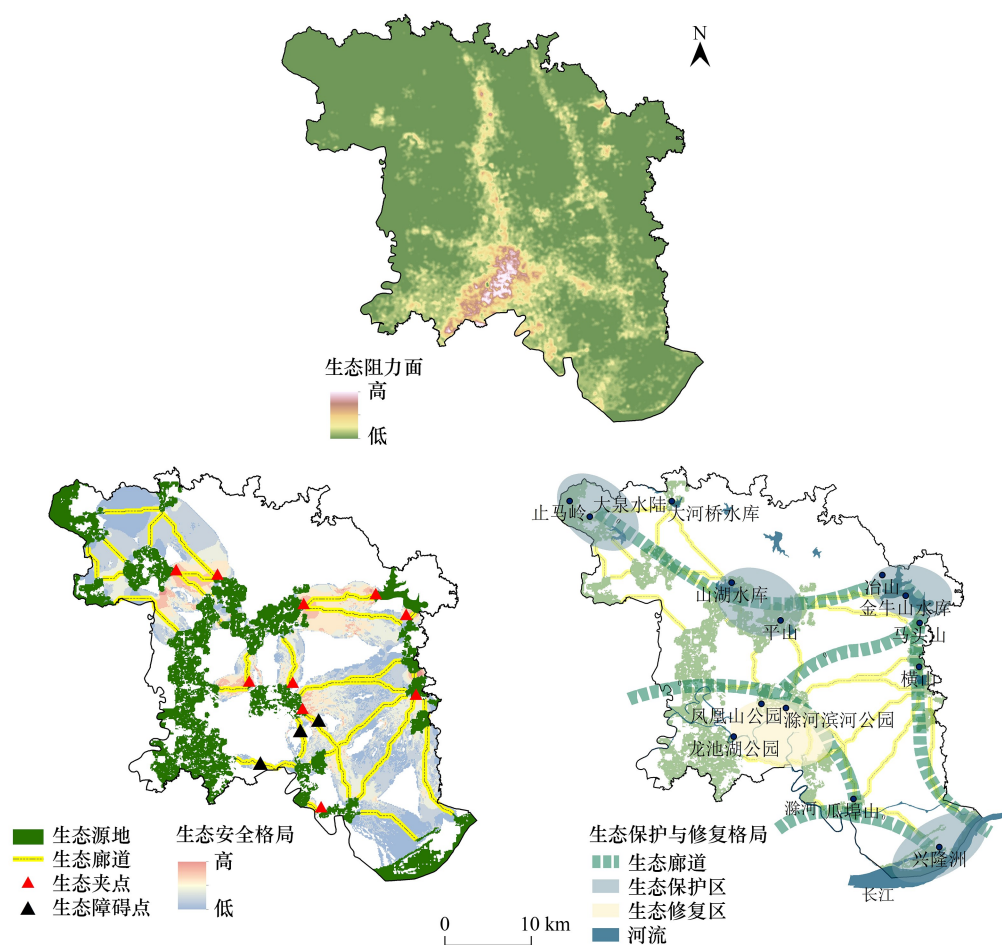


图 5 生态阻力面、生态安全格局及生态保护与修复格局

Fig.5 Ecological resistance surface, ecological security pattern and ecological protection and restoration pattern

4 讨论与结论

4.1 讨论

本文综合考虑了城郊地区的人居环境质量与生态保护需求,选取了特定生态系统服务供需及生态敏感性指标,一定程度上拓展了生态源地的识别方法,提出了一种更适用于城郊地区的生态安全格局构建思路。相较于已有研究,本文量化了生态-社会复合系统对外部干扰与人类活动的响应能力,为识别研究区域内最需保护的生态源地提供了依据。同时,研究框架在生态系统服务供需研究的基础上^[49—50],对生态源地的识别

纳入了生态敏感性指标。虽均聚焦于生态系统服务供需失衡风险,但本文进一步探讨了生态系统服务供需与敏感性之间的耦合关系,可识别高敏感但功能完整的分散型生态源地,这一方法对城郊地区关键生态要素的识别更具适用性。同时,研究与《南京市六合区国土空间总体规划(2021—2035)》相比,在冶山-平山生态过渡带新识别的潜在生态廊道及关键节点,其生态要素具有类似生态绿楔的空间功能,可有效增强区域景观连通性,为生物多样性保护提供生境通道。因此,研究提出的生态保护与修复格局可为国土空间规划体系下的生态网络构建提供一定的补充与完善。

在城郊地区生态安全格局的研究中,尽管本研究提出了基于生态系统服务供需与敏感性分析的耦合思路,但仍存在一定的局限性。具体而言,本文对关键物种的生态需求考虑不够深入,未来研究可以整合人居环境需求导向下城乡居民获取生态系统服务的过程以及自然生态流等多种过程及其与空间格局的关系,包括整合关键物种迁徙廊道的空间识别与优化配置,促进以人与自然和谐共生为导向的生态安全格局构建。其中,廊道宽度很大程度决定了生物迁徙效率,但本文仅初步界定了生态廊道与生态节点的空间分布格局,其具体空间边界及尺度效应仍待探讨。另一方面,本文通过引入生态敏感性分析,强化了具有完整生态功能的自然景观要素识别,未来可将基于阈值的指标量化方法纳入并丰富已有研究框架。

本研究发现,南京市六合区的生态系统服务综合供需比呈现出“北部高、西南部低”的分布趋势,高生态敏感性区域则主要集中在研究区西部的城市化地区。不同的自然条件与社会发展的差异,导致了城郊地区发展的空间异质性,从而造成了生态系统服务的供需失衡^[51]。研究结果不仅能够应对日益增长的人类需求对可持续发展的挑战,也为生态系统的有效管理与城市规划提供了实践参考^[52]。鉴于研究区域内建设用地比例高且人口密集,生态恢复区内与城市居民密切相关的生态系统服务供需水平较低。因此,研究建议通过多功能农业、生物多样性公园及绿色建筑等措施,提升该区域的生态系统服务供给。对于生态保护区,应增强区域的防洪排涝能力、土壤保持能力,以及提高生境质量。对于林地型生态源地,需加强对现有动植物资源的保护;水体型生态源地则应着重于湖泊污染防治及建设管控,以减少人类活动对生态源地的干扰。此外,生态廊道应修复长距离廊道并消除连接森林公园区域的障碍点,以降低外界干扰,增强廊道对生态源地的连通性。

4.2 结论

生态安全格局构建是平衡城郊地区生态保护与人居需求的有效途径。本文综合考虑城郊地区的人居环境质量与生态保护需求,选取特定生态系统服务供需及生态敏感性指标,提出了一种更适用于城郊地区的生态源地识别与生态安全格局构建思路。研究结论如下:

(1) 研究区域生态系统服务呈现显著空间分异,北部因低人口密度与高植被覆盖呈现高供需比,西南部受建设用地扩张与人口压力影响供需失衡严重。需重点保护“高需低供”的薄弱区域,以降低生态服务供需失衡的风险,并关注西南部高敏感性建设用地的生态景观修复。

(2) 共识别出 15 个生态源地(总面积 267.99km²,占 20.59%),呈现“中西部多、东部少”的耕地主导分布特征。30 条生态廊道形成了网络体系,其中短距离廊道集中于西北部,中长距离分布于东部。据此提出了六合区的生态保护与修复格局,通过“五区四廊”的生态网络体系保障城郊地区生态系统服务的可持续供给。

(3) 以六合区为例,研究验证了传统生态源地识别方法未考虑生态敏感性时将忽视 59.5% 受高强度干扰但生态功能完整的生态要素。研究通过耦合生态系统服务供需量化与敏感性分析,可为高保护压力区域的生态安全格局构建提供可行策略,完善了城郊地区的生态规划理论体系。

参考文献(References):

- [1] González-García A, Palomo I, González J A, López C A, Montes C. Quantifying spatial supply-demand mismatches in ecosystem services provides insights for land-use planning. *Land Use Policy*, 2020, 94: 104493.
- [2] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, Müller F. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 17-29.
- [3] Cueva J, Yakouchenkova I A, Fröhlich K, Dermann A F, Dermann F, Köhler M, Grossmann J, Meier W, Bauhus J, Schröder D, Sardemann G, Thomas C, Carnicero A R, Saha S. Synergies and trade-offs in ecosystem services from urban and peri-urban forests and their implication to

- sustainable city design and planning. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 82: 103903.
- [4] Guo Y M, Fu B, Wang Y K, Xu P, Liu Q. Identifying spatial mismatches between the supply and demand of recreation services for sustainable urban river management: a case study of Jinjiang River in Chengdu, China. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 77: 103547.
- [5] Yu K J. Security patterns and surface model in landscape ecological planning. *Landscape and Urban Planning*, 1996, 36(1): 1-17.
- [6] 马克明, 傅伯杰, 黎晓亚, 关文彬. 区域生态安全格局: 概念与理论基础. *生态学报*, 2004, 24(4): 761-768.
- [7] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 杜悦悦. 区域水安全格局构建: 研究进展及概念框架. *生态学报*, 2016, 36(11): 3137-3145.
- [8] Jia Q Q, Jiao L M, Lian X H, Wang W L. Linking supply-demand balance of ecosystem services to identify ecological security patterns in urban agglomerations. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 92: 104497.
- [9] Costanza R, de Groot R, Sutton P, van der Ploeg S, Anderson S J, Kubiszewski I, Farber S, Turner R K. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152-158.
- [10] 景永才, 陈利顶, 孙然好. 基于生态系统服务供需的城市群生态安全格局构建框架. *生态学报*, 2018, 38(12): 4121-4131.
- [11] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 吴健生. 区域生态安全格局构建研究进展与展望. *地理研究*, 2017, 36(3): 407-419.
- [12] Wang Y, Pan J H. Building ecological security patterns based on ecosystem services value reconstruction in an arid inland basin: a case study in Ganzhou District, NW China. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 241: 118337.
- [13] 周汝波, 林媚珍, 吴卓, 刘汉仪, 钟亮. 基于生态系统服务重要性的粤港澳大湾区生态安全格局构建. *生态经济*, 2020, 36(7): 189-196.
- [14] 许峰, 尹海伟, 孔繁花, 徐建刚. 基于 MSPA 与最小路径方法的巴中西部新城生态网络构建. *生态学报*, 2015, 35(19): 6425-6434.
- [15] 沈舟, 尹海伟, 孔繁花, 苏杰, 孙辉, 李久林. 基于生境组团化分析与景观廊道模拟的南京市白鹭生境网络构建与优化. *生态学报*, 2024, 44(8): 3303-3316.
- [16] Zhou Y, Chang J, Chen Z C, Zhou S Y, Zheng G D. Construction of ecological security pattern based on ecological sensitivity assessment in Jining City, China. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2022, 31(6): 5383-5404.
- [17] 李倩瑜, 唐立娜, 邱全毅, 李寿跳, 徐焯. 基于形态学空间格局分析和最小累积阻力模型的城市生态安全格局构建——以厦门市为例. *生态学报*, 2024, 44(6): 2284-2294.
- [18] Shi Y S, Shi D H, Zhou L L, Fang R B. Identification of ecosystem services supply and demand areas and simulation of ecosystem service flows in Shanghai. *Ecological Indicators*, 2020, 115: 106418.
- [19] 赵诚诚, 潘竟虎. 基于供需视角的黄河流域甘肃段生态安全格局识别与优化. *生态学报*, 2022, 42(17): 6973-6984.
- [20] 张豆, 渠丽萍, 张桀滴. 基于生态供需视角的生态安全格局构建与优化——以长三角地区为例. *生态学报*, 2019, 39(20): 7525-7537.
- [21] Gao M H, Li C, Zhao J, Zhao H. Identification of ecological security pattern based on ecosystem service supply and demand in the Yangtze River Delta, China. *Geocarto International*, 2023, 38(1): 2252787.
- [22] 柯钦华, 周俏薇, 庄宝怡, 孙传淳. 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. *生态学报*, 2024, 44(5): 1765-1779.
- [23] Jiang H, Peng J, Dong J Q, Zhang Z M, Xu Z H, Meersmans J. Linking ecological background and demand to identify ecological security patterns across the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area in China. *Landscape Ecology*, 2021, 36(7): 2135-2150.
- [24] Rashidianfar N. Climate change mitigation and adaptation through suburban sustainable landscape: a case study of the City of Colwood [D]. Victoria: Royal Roads University, 2022.
- [25] Forman R T T, Godron M. Patches and structural components for a landscape ecology. *BioScience*, 1981, 31(10): 733-740.
- [26] Liu Y H, Zhong Y F, Ma A L, Zhao J, Zhang L P. Cross-resolution national-scale land-cover mapping based on noisy label learning: a case study of China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2023, 118: 103265.
- [27] Hamel P, Valencia J, Schmitt R, Shrestha M, Piman T, Sharp R P, Francesconi W, Guswa A J. Modeling seasonal water yield for landscape management: applications in Peru and Myanmar. *Journal of Environmental Management*, 2020, 270: 110792.
- [28] 赵宇豪, 罗宇航, 易腾云, 王振宇, 王娜, 吴健生. 基于生态系统服务供需匹配的深圳市生态安全格局构建. *应用生态学报*, 2022, 33(9): 2475-2484.
- [29] Jia L, Deng Y J, Hou M Y, Li Y Y, Ding Z M, Yao S B. Pathways from the payment for ecosystem services program to ecological and socio-economic outcomes. *Ecological Indicators*, 2022, 144: 109534.
- [30] He Q, Wei F, Deng X, Kong F X, Li C, Yan Z C, Qi Y B. Spatiotemporal pattern of carbon productivity and carbon offset potential in Chinese counties. *Science of the Total Environment*, 2022, 846: 157153.
- [31] 许超, 孟楠, 逯非, 刘晓明, 欧阳志云. 生态系统服务需求视角下的澳门城市绿色基础设施管理研究. *中国园林*, 2020, 36(9): 104-109.
- [32] Wu J Y, Huang Y T, Jiang W K. Spatial matching and value transfer assessment of ecosystem services supply and demand in urban agglomerations: a case study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay area in China. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 375: 134081.
- [33] 吴晓. 绿色基础设施生态系统服务供需及景观格局优化研究——以大西安地区为例[D]. 西安: 陕西师范大学, 2020.
- [34] 朱捷缘. 北京市生态休闲服务需求与供给的特征与空间分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016.

- [35] 史春云,陶玉国. 城市绿地空间环境公平研究进展. 世界地理研究, 2020, 29(3): 621-630.
- [36] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, 91(1/2/3): 217-232.
- [37] Zawadzka J E, Harris J A, Corstanje R. Assessment of heat mitigation capacity of urban greenspaces with the use of InVEST urban cooling model, verified with day-time land surface temperature data. *Landscape and Urban Planning*, 2021, 214: 104163.
- [38] 张艺玫,张淑怡,朱泓恺,赵铨钰,王雅葳,王玥,刘敏. 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. 生态学报, 2024, 44(21): 9596-9609.
- [39] 陈昕,彭建,刘焱序,杨畅,李贵才. 基于“重要性—敏感性—连通性”框架的云浮市生态安全格局构建. 地理研究, 2017, 36(3): 471-484.
- [40] 王浩,马星,杜勇. 基于生态系统服务重要性和生态敏感性的广东省生态安全格局构建. 生态学报, 2021, 41(5): 1705-1715.
- [41] Duan Y Q, Zhang L D, Fan X Y, Hou Q H, Hou X M. Smart city oriented ecological sensitivity assessment and service value computing based on intelligent sensing data processing. *Computer Communications*, 2020, 160: 263-273.
- [42] Fu Y J, Shi X Y, He J, Yuan Y, Qu L L. Identification and optimization strategy of county ecological security pattern: a case study in the Loess Plateau, China. *Ecological Indicators*, 2020, 112: 106030.
- [43] 杨志广,蒋志云,郭程轩,杨晓晶,许晓君,李潇,胡中民,周厚云. 基于形态空间格局分析和最小累积阻力模型的广州市生态网络构建. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3367-3376.
- [44] 杨姗姗,邹长新,沈渭寿,沈润平,徐德琳. 基于生态红线划分的生态安全格局构建——以江西省为例. 生态学杂志, 2016, 35(1): 250-258.
- [45] McRae B H, Beier P. Circuit theory predicts gene flow in plant and animal populations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(50): 19885-19890.
- [46] McRae B H, Dickson B G, Keitt T H, Shah V B. Using circuit theory to model connectivity in ecology, evolution, and conservation. *Ecology*, 2008, 89(10): 2712-2724.
- [47] 韩王亚,夏双双,周维,申宇,苏旭坤,刘国华. 基于生态廊道识别的拉萨河流域生态安全格局构建. 生态学报, 2023, 43(21): 8948-8957.
- [48] 韦宝婧,苏杰,胡希军,徐凯恒,朱满乐,刘路云. 基于“HY-LM”的生态廊道与生态节点综合识别研究. 生态学报, 2022, 42(7): 2995-3009.
- [49] 刘立程,刘春芳,王川,李鹏杰. 黄土丘陵区生态系统服务供需匹配研究——以兰州市为例. 地理学报, 2019, 74(9): 1921-1937.
- [50] 荣月静,严岩,王辰星,章文,朱婕缘,卢慧婷,郑天晨. 基于生态系统服务供需的雄安新区生态网络构建与优化. 生态学报, 2020, 40(20): 7197-7206.
- [51] Maron M, Mitchell M G E, Runting R K, Rhodes J R, Mace G M, Keith D A, Watson J E M. Towards a threat assessment framework for ecosystem services. *Trends in Ecology & Evolution*, 2017, 32(4): 240-248.
- [52] Cortinovis C, Geneletti D. A performance-based planning approach integrating supply and demand of urban ecosystem services. *Landscape and Urban Planning*, 2020, 201: 103842.