

DOI: 10.20103/j.stxb.202310182269

张艺玟, 张淑怡, 朱泓恺, 赵铖钰, 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.

Zhang Y W, Zhang S Y, Zhu H K, Zhao C Y, Wang Y W, Wang Y, Liu M. Construction and optimization of the ecological security pattern in metropolitan areas based on the supply and demand of ecosystem services at multiple scales. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(21): 9596-9609.

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

张艺玟¹, 张淑怡¹, 朱泓恺¹, 赵铖钰¹, 王雅葳¹, 王玥¹, 刘敏^{1,2,3,*}

1 华东师范大学生态与环境科学学院, 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200241

2 自然资源部大都市区国土空间生态修复工程技术创新中心, 上海 200241

3 全球城市生态与可持续发展研究所, 上海 200241

摘要:以平衡生态系统服务供需为抓手构建生态安全格局对实现生态安全、提升人类福祉具有重要意义。以高度城市化的大都市区——上海市为研究区域, 运用 InVEST 模型、生态系统服务供需比(ESDR)、耦合协调度(CCD)和最小累积阻力(MCR)模型等方法, 探究上海市生态系统服务供需关系及尺度效应特征, 构建基于供需匹配和耦合协调关系的生态安全格局优化模式。结果表明: (1) 上海市生态系统服务供给和需求均存在显著空间分异, 高供给区主要分布在林地、耕地和水体资源丰富的郊区, 高需求区集中在人口稠密的中心城区。(2) 上海市 ESDR 和 CCD 的空间分异具有明显的尺度依赖性, 1500 m 网格尺度和街镇尺度分别反映研究区内部细节性和整体的供需状况, 可作为生态安全格局构建优化的参考尺度。(3) 由综合生态系统服务供给和供需比共同确定生态源地的空间位置, 共识别上海市生态源地 275 个, 总面积为 303.54 km², 密集分布于城市西部和北部, 472 条生态廊道总长度为 3252.35 km, 呈网状分布, 338 个生态夹点和 411.84 km² 的生态障碍点主要分布在中心城区以外区域。(4) 基于街镇尺度上的生态系统服务供需关系, 上海市 221 个街镇可分为生态协调区(55 个)、生态保育区(89 个)、生态改良区(24 个)、生态控制区(33 个)和生态修复区(20 个)。研究工作可丰富尺度效应相关理论, 为城市化区域开展生态保护修复实践和管理提供借鉴和参考。

关键词:生态系统服务供需; 尺度效应; 生态安全格局; 生态管理分区; 上海市

Construction and optimization of the ecological security pattern in metropolitan areas based on the supply and demand of ecosystem services at multiple scales

ZHANG Yiwen¹, ZHANG Shuyi¹, ZHU Hongkai¹, ZHAO Chengyu¹, WANG Yawei¹, WANG Yue¹, LIU Min^{1,2,3,*}

1 School of Ecology and Environmental Science, East China Normal University, Shanghai Key Laboratory of Urbanization Ecological Process and Ecological Restoration, Shanghai 200241, China

2 Technology Innovation Center for Land Spatial Eco-restoration in Metropolitan Area, Ministry of Natural Resources, Shanghai 200241, China

3 The Global Institute for Urban and Regional Sustainability, Shanghai 200241, China

Abstract: Identifying ecological security patterns (ESPs) is essential for guaranteeing regional ecological security. Achieving a balance in the supply and demand of ecosystem services (ESs) plays a pivotal role in achieving human well-being. Taking the balance of supply and demand for ESs as the starting point, constructing an ecological security pattern is

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFF0802104); 上海市“科技创新行动计划”社会发展科技攻关项目(22dz1202600); 国家自然科学基金(41977399)

收稿日期: 2023-10-18; 网络出版日期: 2024-08-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mliu@re.ecnu.edu.cn

crucial for achieving ecological security and enhancing human well-being. This study focused on Shanghai, a densely urbanized metropolitan area. We examined the scale-responsive characteristics of the supply and demand relationship of ecosystem services, and developed an optimized model for the ecological security pattern. This was accomplished utilizing methods such as the InVEST model, Ecosystem Service Demand and Supply Ratio (ESDR), Coupling Coordination Degree (CCD), and the Minimum Cumulative Resistance (MCR) model. The results showed that: (1) there was significant spatial variation in the levels of both ecosystem services supply and demand in Shanghai. Specifically, the high-supply areas were predominantly distributed in suburban regions with rich resources of forested land, cultivated land, and water bodies, whereas the high-demand areas were concentrated in densely populated central urban areas. (2) The spatial pattern differentiation of ESDR and CCD demonstrated evident scale dependence in Shanghai. The evaluation results of the 1500 m grid scale and township administrative scale respectively reflected the internal details and overall supply-demand conditions of ecosystem services in Shanghai, which could be served as reference scales for optimizing the construction of the ecological security pattern. (3) The spatial location of ecological source sites was jointly determined by the integrated supply of ecosystem services and ESDR at the 1500 m grid scale. A total of 275 ecological source sites were identified in Shanghai, with a total area of 303.54 km², densely distributed in the western and northern regions of the city; 472 ecological corridors with a total length of 3252.35 km were distributed in the form of a network; and 338 ecological pinch points and 411.84 km² ecological obstacles were mainly located outside the central urban area. (4) Based on the supply-demand relationship of ecosystem services at the township scale, the 221 townships in Shanghai could be categorized into ecological coordination zones (55), ecological conservation zones (89), ecological improvement zones (24), ecological control zones (33), and ecological reconstruction zones (20). This research work can enrich the theory related to scale effect. Moreover, it provides invaluable insights and references for directing ecological conservation, restoration practices, and management strategies in urbanized areas.

Key Words: supply and demand of ecosystem service; scale effect; ecological security pattern; ecological management zoning; Shanghai

社会经济迅速发展和城市化不断推进的过程中,一方面自然生态系统向半自然或人工生态系统的加速演化导致生态系统服务下降,另一方面人口增长提高了人类对生态系统服务的需求^[1]。由生态系统服务供需失衡引发的生态环境问题日益突出,如水污染、温室效应、生态用地流失、生物多样性丧失等,直接危及区域生态安全^[2]。生态安全格局构建是保障生态安全的有效途径^[3],生态系统服务供需平衡是实现生态安全的纽带,准确抓住生态系统服务供需关系构建生态安全格局是实现生态安全目标的关键^[4-5]。

生态安全格局指某种潜在的生态系统空间格局,对维护或控制特定地段的生态过程具有重要意义^[6]。目前,区域生态安全格局构建研究逐渐形成了“源地识别—阻力面设置—廊道提取”的基本范式^[7-8]。其中,生态源地识别是核心步骤以及后续分析的基础^[9]。现有研究大多通过评估生态系统服务重要性、景观连通性和生态敏感性来识别生态源地^[10],往往偏重生态系统服务的供给,忽略了人类社会的生态系统服务需求^[11]。随着研究的不断深入,近年来更多学者开始重视生态系统服务供给和需求之间的关系^[12-13],赵诚^[14]与 Niu 等人^[15]通过提取连接生态系统服务高值区和高需求区之间的廊道、选取高生态系统服务供给和供需比区域作为生态源地等方式构建基于供需关系的生态安全格局,以实现区域生态供需平衡目标。

尽管已有研究为基于生态系统服务供需构建生态安全格局提供了相对完备的研究思路,但仍存在完善空间。首先,部分研究局限于生态系统服务供需在量上的匹配关系^[15],忽略了供需在质上的耦合协调关系^[16]。构建生态安全格局的目标是实现区域可持续发展,因此综合考虑生态系统服务供需匹配和耦合协调有助于准确反映“生态系统”与“社会经济系统”的平衡协调性^[17]。其次,多数研究仅基于单个尺度上的生态系统服务供需关系来确定生态源地^[15,18],对供需关系的空间尺度效应及其对源地识别的影响研究不足。综上所述,如何同时顾及生态系统服务供需匹配和耦合协调两方面关系及其尺度效应?是基于供需构建区域生态安全格局亟需解决的重要问题。

上海市作为我国经济高度发达的大都市,面临着不断增长的城市扩张需求与生态保护之间的显著矛盾^[19]。作为长三角生态绿色一体化发展的战略交汇点,上海是我国“三区四带”生态保护修复总体格局的重要组成部分。因此,本文基于上海市本地特征,选取4种典型生态系统服务,使用InVEST模型、生态系统服务供需比、耦合协调度和最小累积阻力模型等方法,旨在同时顾及生态系统服务供需两方面关系及其尺度效应,以供需平衡为目标构建与优化生态安全格局。具体而言,本研究拟回答以下3个问题:(1)上海市生态系统服务供需具有怎样的空间格局?(2)生态系统服务供需关系对空间尺度如何响应,生态安全格局构建与优化应参考何种尺度?(3)在适宜尺度下,如何通过供需匹配和耦合协调两方面关系开展生态安全格局与优化工作?研究工作可丰富尺度效应相关理论,为城市化区域开展生态保护修复实践和管理提供借鉴和参考。

1 研究区概况

上海市($30^{\circ}40'—31^{\circ}53'N$, $120^{\circ}52'—122^{\circ}12'E$)位于我国东部,地处长江与钱塘江入海口交汇处。地势低平,属北亚热带季风性气候,四季分明,日照充分,雨量充沛。研究区域覆盖了上海市16个市辖区,包括221个街镇,总面积6340 km²。内环、中环、外环和郊环四个道路环线将上海市分为五个区域,简称“四环五区”(图1),以外环线以内地区作为中心城范围(《上海市城市总体规划(1999—2020年)》)。2020年,上海市常住人口达2487万(全国1.80%),国内生产总值达37987.55亿元(全国3.86%),人口城市化率高达90%,远超全国平均水平(63.89%)。《上海市城市总体规划(2017—2035年)》明确提出建设更可持续发展的生态之城目标,缓解上海市人口快速增长与资源环境紧约束之间的矛盾迫在眉睫。

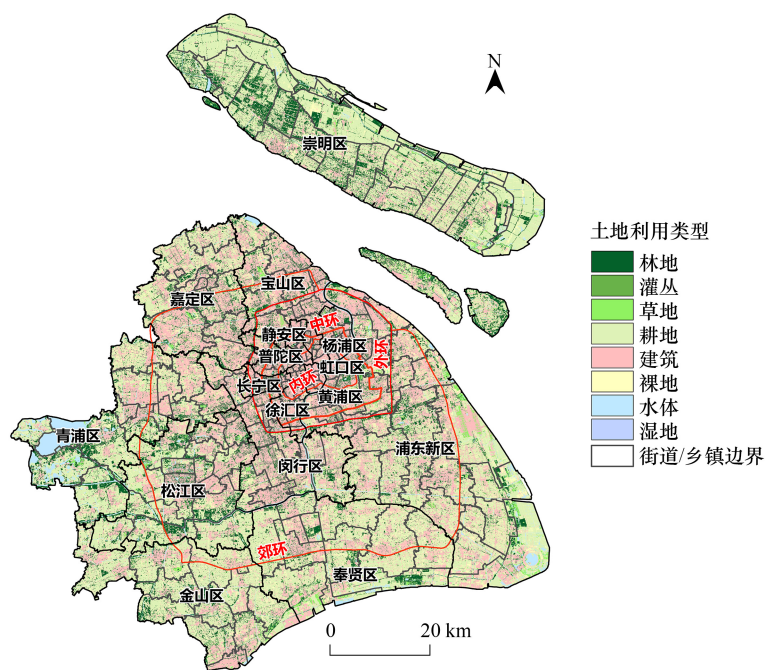


图1 上海市行政区划及土地利用现状(2020年)

Fig.1 Administrative divisions and land use in Shanghai (2020)

2 数据来源与研究方法

2.1 研究思路

在综合考虑上海市本地特点和数据可获取性等因素的基础上,选取粮食供应、碳固持、休闲娱乐和生境维持4种典型生态系统服务,评估各项生态系统服务的供需水平,识别生态系统服务供需状态;通过分析生态系

统服务供需比和耦合协调度在不同尺度上的变化特征,揭示供需关系对尺度的敏感性,并确定生态安全格局构建的参考尺度;在确定的尺度下基于生态该系统服务供需匹配和耦合协调关系开展生态源地识别、阻力面构建、廊道提取、生态夹点和障碍点识别以及生态管理分区等工作,最终形成生态安全格局优化模式。具体技术路线如图 2 所示。

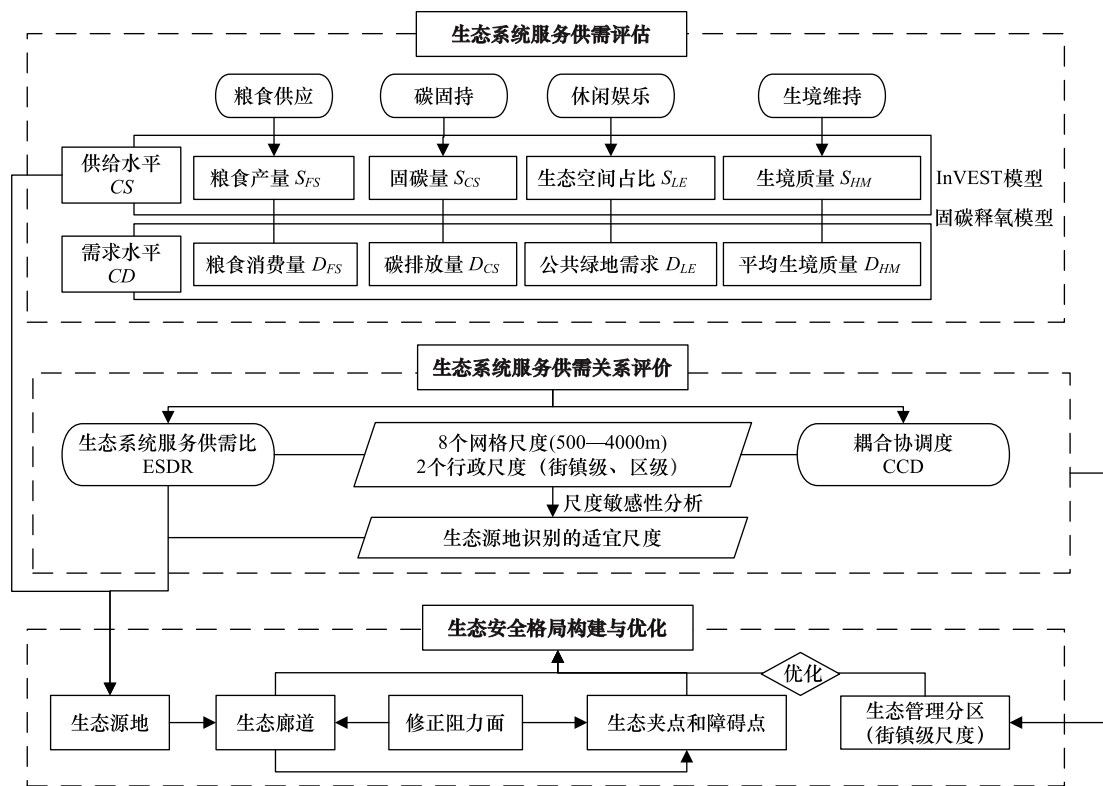


图 2 本研究技术路线

Fig.2 Technical roadmap

CS:综合生态系统服务供给;CD:综合生态系统服务需求; S_{FS} :粮食供应服务供给; S_{CS} :碳固持服务供给; S_{LE} :休闲娱乐服务供给; S_{HM} :生境维持服务供给; D_{FS} :粮食供应服务需求; D_{CS} :碳固持服务需求; D_{LE} :休闲娱乐服务需求; D_{HM} :生境维持服务需求;ESDR:生态系统服务供需比;CCD:耦合协调度

2.2 数据来源

本文使用的基础数据包括:土地利用/覆被数据、归一化植被指数、粮食产量数据、数字高程模型、净初级生产力、交通路网数据、高风险建设用地数据、人口密度数据、二氧化碳排放量数据、常住人口数据、国内生产总值以及夜间灯光数据,涉及到的数据年份均属于 2020 年,详细信息见表 1。

2.3 研究方法

2.3.1 生态系统服务供需评估

上海市综合生态系统服务供给和需求水平由粮食供应等 4 种服务等权重叠加,各种服务的具体评估方法和计算过程见表 2,计算方法如下:

$$CS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S'_i \quad (1)$$

$$CD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D'_i \quad (2)$$

式中,CS 和 CD 分别表示综合生态系统服务供给和需求水平; n 是生态系统服务的种类数,本研究中 $n=4$; S'_i

是 i 种生态系统服务供给归一化值, D'_i 是 i 种生态系统服务需求归一化值, 为了消除不同生态系统服务的维度效应, 对各项服务供给和需求进行线性归一化处理。自然断点法能实现组内差异较小、组间差异较大的分类结果, 故使用自然断点法将 CS 和 CD 分为高、较高、中等、较低、低五个等级。

表 1 研究数据信息与来源

Table 1 Research data information and source

数据名称 Data name	空间分辨率 Spatial resolution	数据用途 Data usage	数据来源 Data source
土地利用/覆被数据 Land use/cover	10 m	4 种生态系统服务供给评估、阻力面构建	欧空局 (ESA) World Cover 数据集 (https://www.easa.europa.eu/)
归一化植被指数 Normalized Difference Vegetation Index, NDVI	30 m	粮食供应供给量评估	基于谷歌地球引擎 (https://earthengine.google.com/), 参考徐新良 ^[20] 的方法利用哨兵 2 (Sentinel-2) 遥感影像计算
粮食产量数据 Grain yield data	乡级行政区		研究年上海市各区统计年鉴
数字高程模型 Digital Elevation Model, DEM	90 m	碳固持服务供给量评估, 即 IUEMS 模型输入	由美国国家航空航天局 (NASA) 和国防部国家测绘局 (NIMA) 联合测量 (http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/)
净初级生产力 Net Primary Productivity, NPP	500 m		美国地质勘探局 (http://www.usgs.gov/)
交通路网数据 Traffic network data	90 m	生境维持供需量评估, 即 InVEST 模型输入	OpenStreetMap 平台 (https://www.openstreetmap.org/)
高风险建设用地数据 High risk construction land data			
人口密度数据 Population density data	1 km	粮食供应、碳固持和休闲娱乐需求量评估	LandScan 提供的全球人口动态数据 (https://landscan.ornl.gov/)
二氧化碳排放量 Carbon dioxide emission	省级行政区	碳固持需求评估	多尺度排放清单模型平台 MEIC (http://meicmodel.org.cn/)
常住人口数据 Permanent population data	县级行政区		研究年上海市统计年鉴
国内生产总值 Gross Domestic Product, GDP	县级行政区		研究年上海市各区统计年鉴
夜间灯光数据 Nighttime light image	1 km	阻力面构建	国家地球科学数据中心 (http://www.geodata.cn/)

2.3.2 生态系统服务供需关系评价

生态系统服务供需比 (ESDR) 是评价生态系统服务供需在空间上匹配度的指标^[15,23], 用以揭示生态系统服务的盈余或赤字状态。本研究取各类生态系统服务供需比的平均值来表征综合供需匹配状况, 计算方法如下:

$$ESDR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ESDR_i \tag{3}$$

$$ESDR_i = \frac{S'_i - D'_i}{(S'_{i,max} + D'_{i,max})/2} \tag{4}$$

式中, $ESDR$ 表示综合生态系统服务供需比; $ESDR_i$ 是 i 种生态系统服务的供需比; $S'_{i,max}$ 和 $D'_{i,max}$ 分别是 S'_i 和 D'_i 的最大值。利用自然断点法将 $ESDR$ 按照供需由赤字到盈余的程度分为高度赤字、中度赤字、供需平衡、中度盈余和高度盈余 5 个等级。

耦合协调度 (CCD) 模型被广泛应用于研究经济-社会-环境、生产-生活-生态等系统之间的相互作用^[17], 反映了系统从无序到有序的进程和协同程度。引入 CCD 模型来表征生态系统服务供给和需求两系统之间的相互作用、协调发展程度^[24], 取各种生态系统服务耦合协调度的平均值来表征综合耦合协调度, 计算方法如下:

表 2 4 种生态系统服务供给和需求评估方法

Table 2 Evaluation methods for supply and demand of four ecosystem services

生态系统服务 Ecosystem services	供给/需求指标 Supply/ Demand indicators	原理与方法 Principles and methods	计算过程 Calculation process
粮食供应 Food supply	粮食产量	根据粮食产量与 NDVI 的线性关系,基于 NDVI 将粮食总产量空间化	$S_{FS} = P_j \times \frac{NDVI_i}{NDVI_{sum}}$ 式中, S_{FS} 表示粮食供应服务供给(t); P_j 为粮食产量(t); $NDVI_i$ 为耕地斑块 <i>i</i> 的 NDVI 值; $NDVI_{sum}$ 为斑块 <i>i</i> 所在街镇的耕地总 NDVI 值
	粮食消费量	基于夜间灯光数据划分城市和农村,通过城市/农村的年人均口粮消费量计算	$D_{FS} = C \times POP_i$ 式中, D_{FS} 表示粮食供应服务需求(kg); C 为人均粮食消费量(kg/人),根据《2021 年上海市统计年鉴》,城镇人口每年粮食消费量为 97.78 kg/人,农村为 161.45 kg/人; POP_i 为人口数量(人)
碳固持 Carbon sequestration	固碳量	中国科学院生态环境研究中心自主开发的在线平台——城市生态智慧管理系统(IUEMS)的固碳释氧模型 ^[21]	$S_{CS} = Q_{CO_2}$ $Q_{CO_2} = M_{CO_2} / M_C \times NEP$ $NEP = \alpha \times NPP \times M_C / M_{CHO}$ 式中, S_{CS} 表示碳固持服务供给(t CO ₂ /a); Q_{CO_2} 为生态系统固碳量(t CO ₂ /a); M_{CO_2} / M_C 为 C 转化为 CO ₂ 的系数,即 44/12; NEP (Net Ecosystem Productivity)为净生态系统生产力(t C/a),根据本地 NEP 和净初级生产力 NPP 的转换系数 α 计算得到; M_C / M_{CHO} 为干物质转化为 C 的系数,即 72/162
	碳排放量	将总碳排放量按照人均碳排放因子计算和人口密度分配到栅格 ^[22]	$D_{CS} = POP_i \times \varphi(i)$ 式中, D_{CS} 表示碳固持服务需求(t); $\varphi(i)$ 为栅格 <i>i</i> 的人均碳排放量(t/人);通过各区的人均 GDP 与上海市人均 GDP 的比值加权平均 2020 年上海市总碳排放量(1.58 亿 t),获得人均碳排放量
休闲娱乐 Leisure and entertainment	生态空间占比	划分 0.5 km×0.5 km 的网格,计算网格内的生态空间(林地、草地、水体和湿地)的面积占比	$S_{LE} = \frac{Area_{es}}{Area}$ 式中, S_{LE} 表示休闲娱乐服务供给; $Area_{es}$ 为网格内生态空间的面积(km ²); $Area$ 为网格的总面积,即 0.25 km ²
	公共绿地需求	按照政府部门建议的绿地面积和人口密度计算	$D_{LE} = POP_i \times Area_{gov}$ 式中, D_{LE} 表示休闲娱乐服务需求(m ²); $Area_{gov}$ 为政府建议的绿地面积(m ² /人),为 13 km ² (《上海市城市总体规划(2017—2035 年)》)
生境维持 Habitat maintenance	生境质量	InVEST 模型中生境质量模块(Habitat Quality Model)	$S_{HM} = Q_{ix}$ $Q_{ix} = H_x \left[1 - \left(\frac{D_{ix}^z}{D_{ix}^z + k^2} \right) \right]$ 式中, S_{HM} 表示生境维持服务供给; Q_{ix} 为土地覆被类型 <i>x</i> 区域栅格 <i>i</i> 的生境质量; D_{ix} 为土地覆被类型 <i>x</i> 区域栅格 <i>i</i> 的生态环境胁迫程度; H_x 为生境适宜度; k 为半饱和参数
	平均生境质量	以栅格所在街镇的平均生境质量代表	$D_{HM} = Q_{ij}$ 式中, D_{HM} 表示生境维持服务需求; Q_{ij} 为栅格 <i>i</i> 所在街镇 <i>j</i> 的平均生境质量

$$CCD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n CCD_i \tag{5}$$

$$CCD_i = \sqrt{C_i \times T_i} \tag{6}$$

$$C_i = 2 \sqrt{(S'_i \times D'_i) / (S'_i + D'_i)^2} \quad (7)$$

$$T_i = a \times S'_i + b \times D'_i \quad (8)$$

式中, CCD 是综合耦合协调度; CCD_i 是 i 种生态系统服务的供需耦合协调度, 取值为 $[0, 1]$; C_i 为耦合度; T_i 为两系统综合评价指数; a 、 b 为比重, $a = b = 0.5$ 。结合相关研究成果^[17,25]和本研究实际结果, 将 CCD 划分为五个区间: $[0, 0.25]$ 、 $(0.25, 0.35]$ 、 $(0.35, 0.55]$ 、 $(0.55, 0.75]$ 和 $(0.75, 1]$, 分别表示生态系统服务供需高度失调、中度失调、基本协调、中度协调和高度协调状态。

生态系统服务供需具有尺度依赖性, 深入揭示供需关系尺度效应对于平衡生态系统服务供需具有指导性作用^[26-27]。因此, 本研究通过探究 8 个网格单元尺度 (500—4000 m, 以 500 m 为间隔) 和 2 个行政区划尺度上 (街镇尺度和市辖区尺度) 的生态系统服务供需关系, 分析上海市生态系统服务供需匹配和耦合协调关系的空间异质性的响应特征, 为后续生态安全格局构建与优化提供参考。

2.3.3 生态安全格局构建与优化

(1) 生态源地识别

生态源地是能为人类福祉提供可持续性的生态系统服务的重要斑块, 这要求生态源地不仅需要有较高的生态系统服务供给能力, 还要能满足人类需求^[28]。因此, 本研究中的生态源地由综合生态系统服务供给 (CS) 和综合生态系统服务供需比 (ESDR) 共同确定, 选取评价结果为较高、高供给区域和中度盈余、高度盈余区域的交集作为生态源地。

(2) 阻力面构建与生态廊道提取

生态系统中进行物质交换、能量传输和生物迁徙时需要克服阻力, 本研究以土地利用类型为基础, 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据表征人类活动干扰进行修正, 具体如下式所示:

$$R_i = \frac{NL_i}{NL_a} \times R \quad (9)$$

式中, R_i 是修正后的阻力值; NL_i 为夜间灯光指数; NL_a 为栅格 i 对应的土地利用类型 a 的平均夜间灯光指数; R 为栅格 i 对应土地利用类型的基本生态阻力系数, 参考前人研究^[29-30]进行赋值。

生态廊道是保障生态功能、生态过程、能量在生态源地间顺利流动的关键载体, 本研究基于最小累积阻力模型 (Minimum Cumulative Resistance, MCR), 借助 Linkage Mapper 2.0 工具提取, 模型公式如下:

$$MCR = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} D_{ij} \times R_i \quad (10)$$

式中, MCR 为最小累积阻力值; D_{ij} 为物种从源 j 到景观单元 i 的空间距离; R_i 为景观单元 i 对某物种运动的阻力系数; f 表示最小累积阻力与生态过程的正相关关系。单位长度阻力位于前 10% 的生态廊道为需保护的低阻力廊道, 后 10% 为需修复的高阻力廊道, 其余为普通廊道。

(3) 生态夹点与障碍点识别

生态夹点是廊道中电流密度较大的区域, 对维持整个网络的连接性非常重要, 具有重要生态保护价值。本研究使用 Pinchpoint Mapper 工具来识别生态夹点, 按照自然断点法将电流密度分为五个等级, 选择最高级作为夹点, 将位于高、低阻力廊道上的夹点定为一二级夹点, 其余为二级夹点。

生态障碍点是阻碍物种在生境斑块间运动的区域, 移除后可以显著增加生态源地间的连通性^[31]。本研究运用 Barrier Mapper 工具, 从 400—800 m, 以 200 m 为步长探测, 将改进得分结果按自然断点法分为五个等级, 五级、四级区域分别作为一级、二级障碍点。

(4) 生态管理分区

科学合理的生态管理分区能确保生态安全建设的精确和高效^[32], 是优化生态安全格局、落实生态文明的有效方式^[33]。从生态保护的角度出发, 按照“生态系统服务失衡越严重, 保护优先级越高”的理念^[19,24], 基于生态系统服务匹配关系和耦合协调程度提出大都市区生态管理分区, 具体方法如表 3 所示。

表 3 生态管理分区方法
Table 3 Ecological management zoning method

生态系统服务供需关系 Supply-demand relationship of ecosystem services	协调(高度协调、中度协调和基本协调) Coordinate (Good coordination, moderate coordination and basic coordination)	失调(中度失调和高度失调) Incoordinate (Moderate incoordination and severe coordination)
盈余(高度盈余和中度盈余) Surplus (high surplus and moderate surplus)	生态协调区	生态保育区
供需平衡 Balance	生态改良区	
赤字(中度赤字和高度赤字) Deficit (high deficit and moderate deficit)	生态控制区	生态修复区

3 结果与分析

3.1 上海市生态系统服务供需格局

上海市各生态系统服务供给和需求均存在显著的空间异质性(图 3)。粮食供应服务(S_{FS})高供给区主要位于耕地分布广泛的金山区和崇明区,平均粮食产量分别为 4.45×10^3 t/a 和 2.30×10^3 t/a。碳固持服务(S_{CS})主要来自于林地、耕地和草地占比大的东部和北部;休闲娱乐服务(S_{LE})和生境维持服务(S_{HM})分布格局高度相似,主要位于崇明区(林地)、青浦西部(淀山湖水体)、奉贤南部(海湾森林公园)以及浦东新区东部(滴水湖水体),这是由于林地、水体等能同时提供良好的生境和休闲娱乐价值。综合生态系统服务供给(CS)较高和高等级占比之和为 15.88%,主要分布在崇明区北部、青浦区西部和浦东新区东部,承担着上海市核心生态屏障作用^[34]。

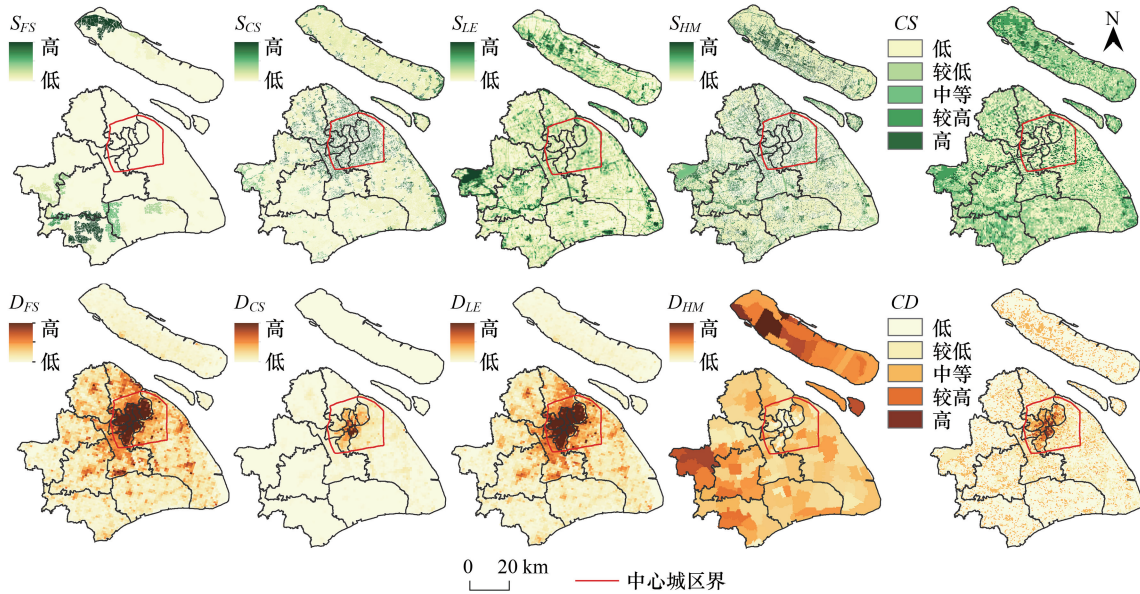


图 3 上海市生态系统服务供需空间分布

Fig.3 Spatial distribution of supply and demand of comprehensive ecosystem services in Shanghai

从生态系统服务需求来看,粮食供应(D_{FS})、碳固持(D_{CS})和休闲娱乐(D_{LE})3 种服务呈现相似的空间格局(图 3),高需求区集中在人口稠密且人类活动密集的中心城区。生境维持服务(D_{HM})格局稍显不同,高需求区主要分布在崇明区和青浦区等整体生境质量较好的区域,平均需求分别为 0.25 和 0.24。综合生态系统服务需求(CD)较高的区域集中在黄浦区(0.41)和虹口区(0.35)等城市核心区,平均需求量是其他行政区的

十倍以上。

3.2 上海市生态系统服务供需关系的尺度响应特征

上海市生态系统服务供需比(ESDR)总体呈现中心城区低、周围高的特征,高值区主要分布在崇明区西部、青浦区西部和浦东新区东部(图4)。评价尺度从网格单元提升到行政单元,ESDR 的数值范围呈减小趋势,供需平衡和盈余区域逐渐增多,供需匹配关系的空间异质程度不断缩小(图5)。生态系统服务供需耦合协调度(CCD)总体表现为中心城区高、周围低的特征,低值区主要分布在东部和南部(图4)。随着评价尺度扩大,CCD 数值明显增大,基本协调区域不断增多,在行政尺度上甚至出现了中度协调区域(图5)。

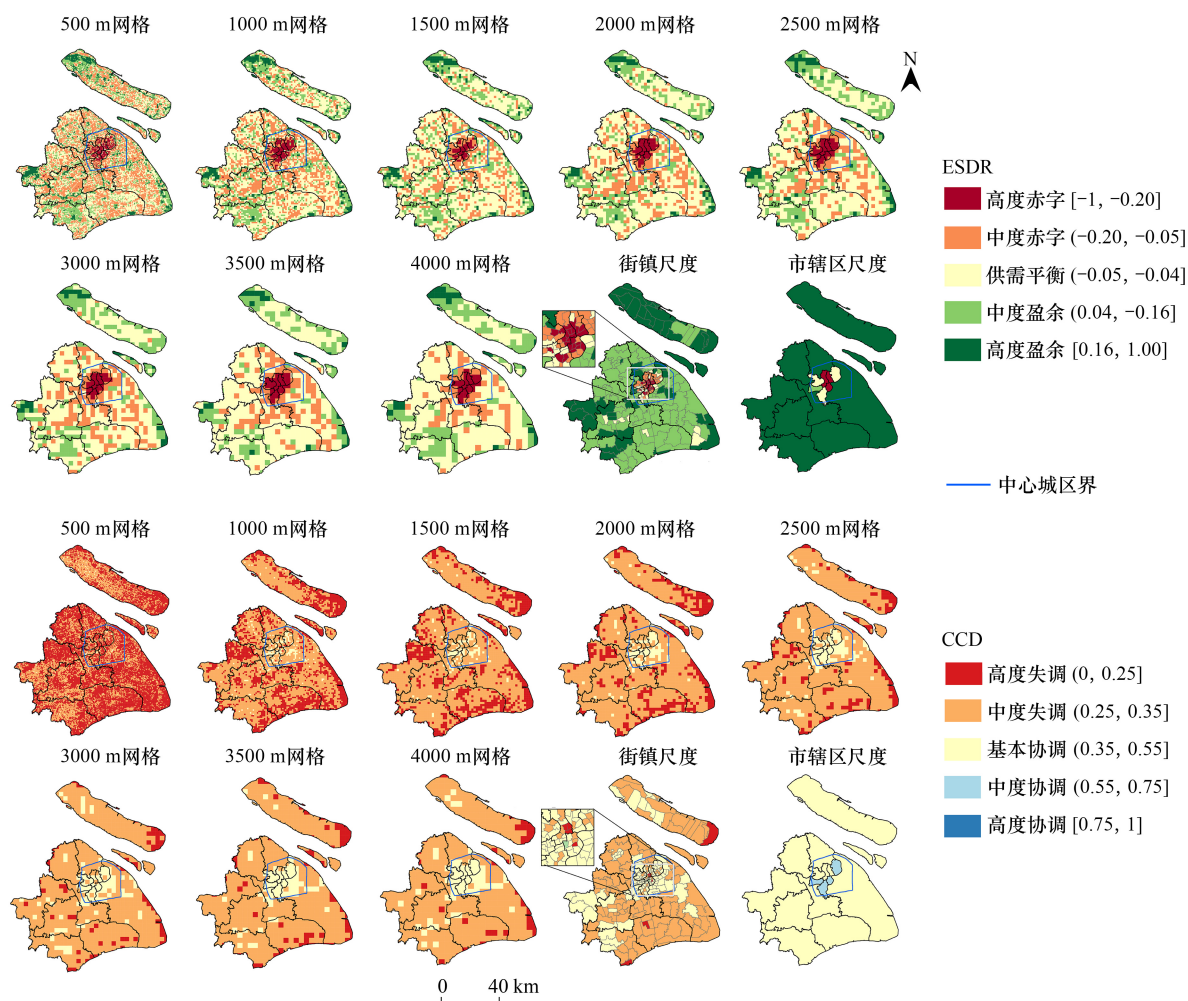


图4 上海市综合生态系统服务供需比(ESDR)、耦合协调度(CCD)空间分异对尺度变化的响应

Fig.4 Response of spatial variation in the comprehensive ecological supply-demand ratio (ESDR) and the comprehensive coupling coordination degree(CCD) to scale changes in Shanghai

总体而言,上海市生态系统服务供需关系对空间尺度变化具有较高敏感性。细网格尺度反映内部细节性的供需关系,而行政尺度体现大范围内整体性的供需关系。基于供需关系进行区域生态系统管理时,如果仅参考一个尺度,容易造成供需关系的误判。因此,在不同尺度上提升生态系统服务产生—传递—使用过程的完整性和持续性,是实现区域可持续发展的重要途径^[35-36]。对于上海市而言,街镇是最小的行政管理单位,具有明显的自然和经济属性,可反映生态系统服务整体供需状况;1500 m 网格尺度的结果较稳定,同时在最大程度上反映了细节性的供需关系。因此,街镇尺度和 1500 m 网格尺度可作为上海市态安全格局构建与优化的参考尺度。

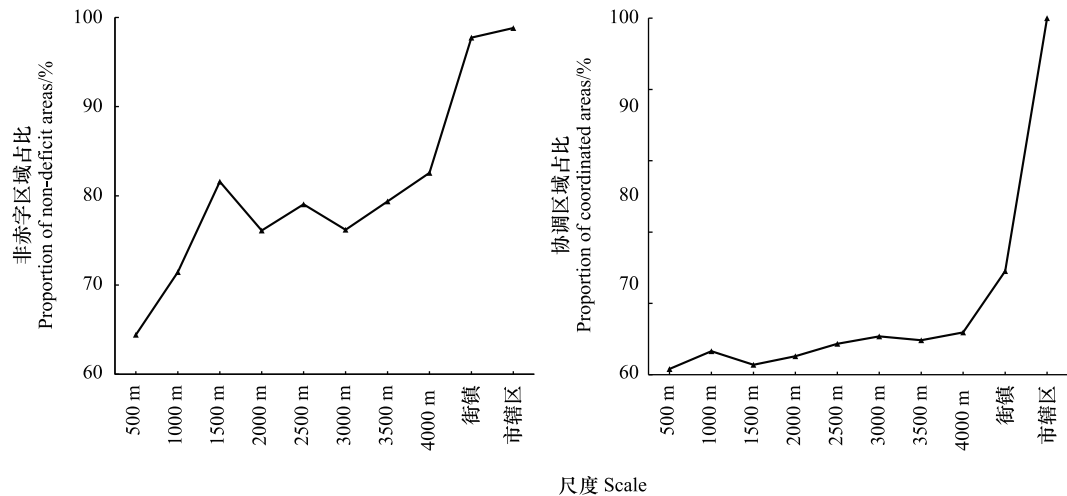


图5 上海市非赤字区域(ESDR>-0.05)、协调区域(CCD>0.35)面积占比对尺度变化的响应

Fig.5 Response of the area proportion of non-deficit areas (ESDR > -0.05) and coordinated areas (CCD > 0.35) to scale changes in Shanghai

3.3 上海市生态安全格局构建与优化

为实现自然资源合理配置,本研究由综合生态系统服务供给(CS)和1500 m尺度上生态系统服务供需比(ESDR)共同确定生态源地的空间位置(图6),进而开展阻力面构建、廊道提取、生态夹点和障碍点和生态管理分区等工作,形成“源地—廊道—夹点和障碍点—管理分区”上海市生态安全格局优化模式。

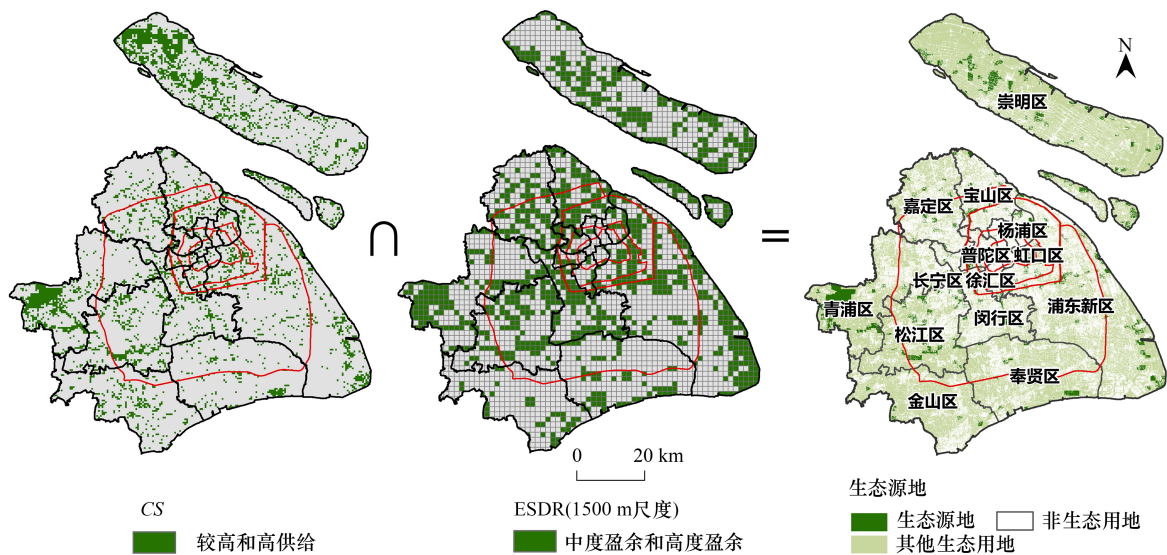


图6 上海市生态源地分布

Fig.6 Spatial distribution of ecological sources in Shanghai

结果表明上海市生态源地共275个,总面积303.54 km²,在城市西部和北部分布较密集,其他区域零星分布。生态源地的土地利用类型以林地(43.67%)为主,耕地(29.16%)和草地(24.41%)为次。在16个行政区中,青浦区生态源地面积最大(77.95 km²),其次是崇明区(73.63 km²)、浦东新区(47.40 km²)和松江区(26.54 km²);黄浦区(1.12 km²)和长宁区(0.56 km²)等有少量生态源地分布,静安和徐汇两区无源地分布。总体而言,生态源地主要分布在郊环外区域,共205.51 km²(表4),向内环逐渐递减。

表 4 上海市城市四个环线划分区域的生态源地分布

Table 4 Distribution of ecological sources of four rings in Shanghai

环线范围 Ring range	生态源地数量 Number of ecological sources	生态源地面积/km ² Area of ecological sources
内环内 Inside the Inner ring	10	6.56
中内环 Inner ring-Middle ring	3	1.57
中外环 Outer ring-Suburban ring	35	33.27
外郊环 Outer ring-Suburban ring	70	56.64
郊环外 Outside the Suburban ring	157	205.51
合计 Total	275	303.54

上海市生态阻力系数呈现城市中心高、周围低的分布特征(图 7)。阻力值较高的区域主要分布在人为活动强度大的城市中心,阻力低值区主要位于生态用地分布广、人口较少的郊区。基于生态源地和生态阻力面,共提取生态廊道 472 条,总长度约 3252.35 km,其中低阻力廊道 90.93 km,高阻力廊道 213.57 km。生态廊道呈网状分布,中心城区内生态廊道“多而短”,中心城区外“少而长”。这是因为中心城区外生态源地的生境质量较好且源地间阻力值较小,而中心城区内的源地相对破碎且生境脆弱,需要更多的廊道来连接。

识别出上海市生态夹点共 338 个,从内环到郊环夹点数量逐渐增加(图 8)。外环内的行政区夹点数量较少(10 个以内),静安区无夹点分布;浦东新区(68 个)夹点数量最多,松江区(52 个)次之。一级夹点主要分布在中心城区及其附近区域,在实施生态保护措施时应优先关注。生态障碍点共 411.84 km²,集中在郊环内靠近外环的区域,并向西部倾斜分布。一级障碍点共 115.43 km²,大多分布在生态廊道折点处或交界处。从行政区划来看,宝山区(101.43 km²)和嘉定区(81.75 km²)的障碍点面积较大,这些区域工业产业发展集中,在管理过程中应当予以重视。

依据街镇尺度的生态系统服务供需和耦合协调关系,上海市 221 个街镇共分为 5 类生态管理分区(图 9)。生态协调区(55 个)主要分布在青浦区、崇明区和浦东新区,这些街镇经济发展状况较好,生态本底质量佳,社会经济生态需求得到满足,应加强社会发展与生态保护之间的协调共生,进行科学布局,严控管理。生态保育区(89 个)主要位于崇明区、奉贤区和浦东新区,该区自然资源富足,社会需求相对较少,应以生态保护为前提,适当调整农业产业结构。生态改良区(24 个)主要分布在徐汇区、长宁区和和松江区,这些街镇生态供给和需求均处于中等水平,在满足社会需求的同时避免了资源浪费,应完善城市绿色基础设施建设,提高生态综合供给能力。生态控制区(33 个)集中在中心城区,该区生态供给较良好,但仍不能满足人类社会的高需求,应严格控制开发利用强度。生态修复区(20 个)也集中在中心城区,该区生态供给非常有限,但人口分布密集,“供不应求”矛盾突出,应着力推动生态修复工程,以恢复生态供给为目标。

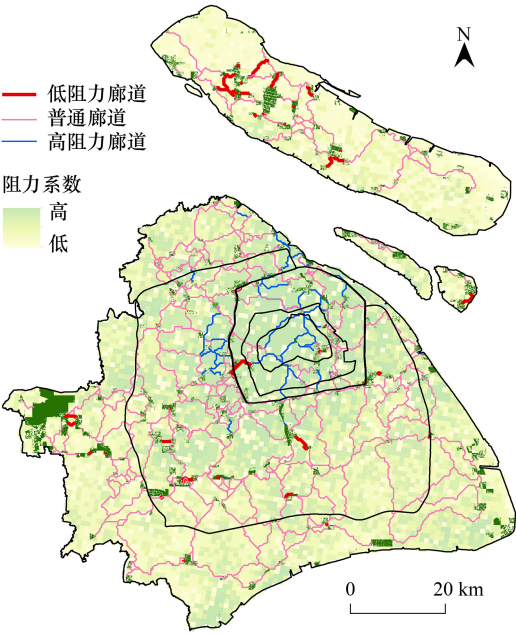


图 7 上海市生态阻力面和生态廊道空间分布

Fig.7 Spatial distribution of ecological resistance surface and ecological corridors in Shanghai

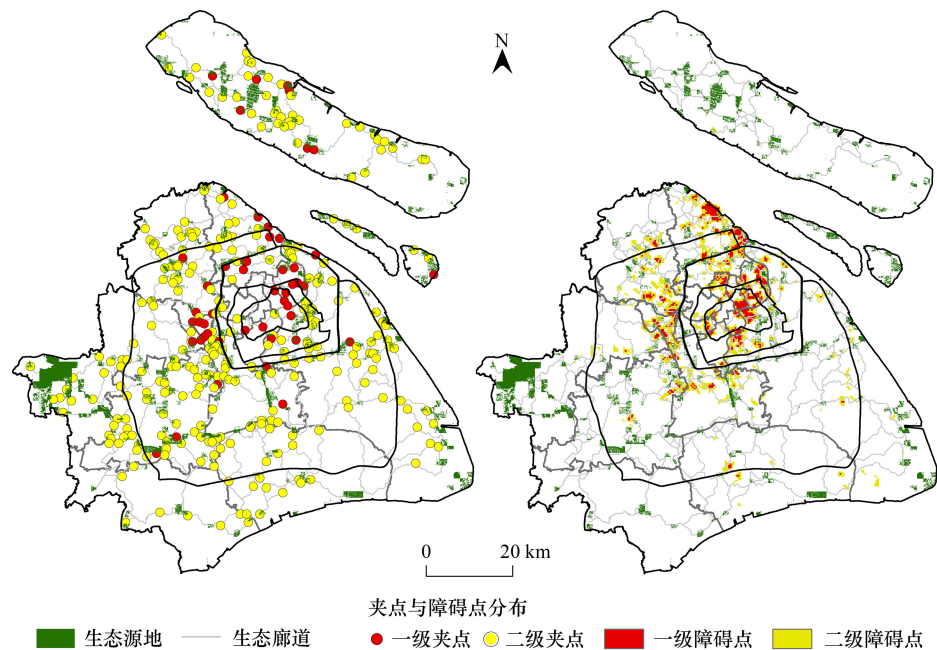


图 8 上海市生态夹点和障碍点空间分布

Fig.8 Spatial distribution of ecological pinch-points and barriers in Shanghai

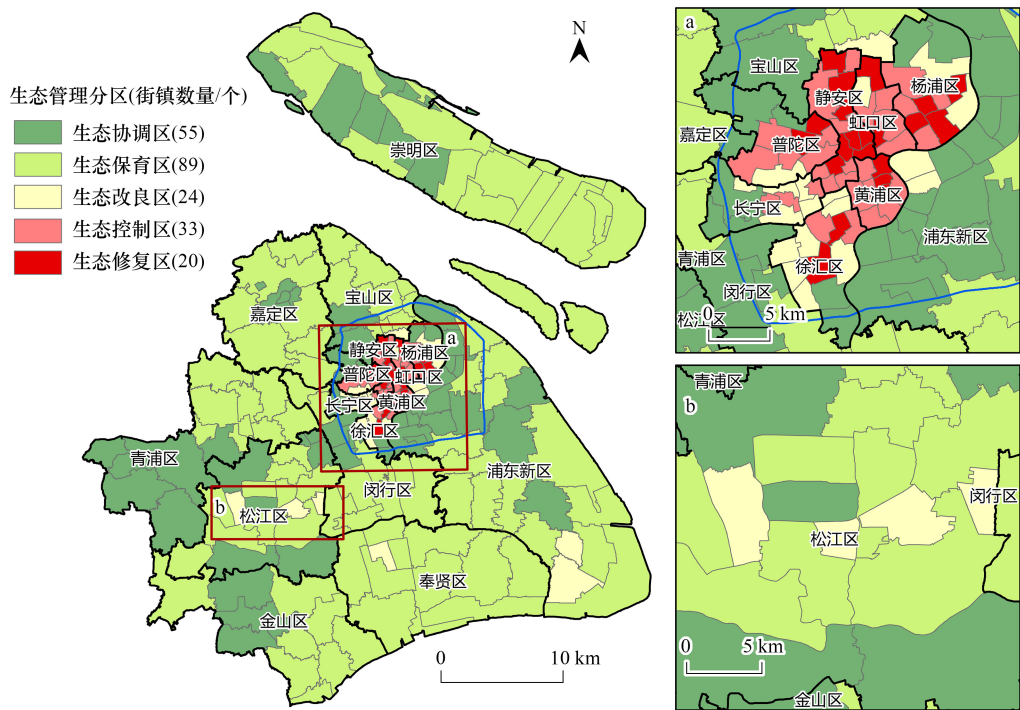


图 9 上海市生态管理分区

Fig.9 Ecological management zoning of Shanghai

4 讨论与结论

4.1 讨论

本研究在评估上海市生态系统服务供需状态及供需关系的基础上,由生态系统服务供给和供需比共同确

定生态源地,识别出源地 303.54 km²。与 2023 年 6 月发布的《上海市生态保护红线》对比,研究识别出的源地范围内基本涵盖了文件中提及的海湾国家森林公园、东平国家森林公园、淀山湖等地。与以往在本区域的研究相比,本研究识别出的上海市生态源地总面积相对较小^[37-38]。这是由于本研究筛选过程中将生态系统服务供给水平高但无法满足人类需求的斑块剔除,以确保生态资源的可持续供给^[28]。此外,本研究选择粮食供应、碳固持、休闲娱乐和生境维持服务纳入生态源地识别的生态系统服务类型,主要基于以下考量:目前大多数学者基于千年生态系统评估中的生态系统服务分类体系,选取粮食供应、水源供给、洪水调节、碳固持、休闲娱乐或生境维持等作为代表性服务^[13]。首先考虑到上海市淡水资源丰富,相比于水源供给,保障都市农业发展底线更为重要。其次,上海地处江南水乡,水系发达,分析碳固持服务比洪水调节更有意义。此外,在大都市区,休闲娱乐是知识经济时代城市居民的迫切需求。最后,生境维持服务不仅与生物多样性和初级生产等密切相关,还是上海可持续发展的根本任务。总体而言,各地区资源禀赋不同,需要因地制宜地选择生态系统服务类型作为识别源地的评价因子。

生态系统服务供需是连接社会经济系统和自然生态系统的重要桥梁,供需平衡体现了人与自然和谐共生的城市规划目标。通过生态系统服务供需关系的定量评估可以更加精准地反映城市的生态安全状态,为生态系统管理提供依据^[39]。在现有研究基础上,本研究探究了生态系统服务供需关系对空间尺度的响应特征并确定生态源地识别的适宜尺度,在一定程度上丰富了尺度效应相关理论,对生态源地的准确识别提供了科学支撑和案例支持。此外,本研究进一步在乡镇尺度上同时考量生态系统供需匹配和耦合协调两方面关系进行生态管理分区,形成宏观生态修复主导战略和内部精细化管理相结合模式,进而推动区域高质量发展^[17,40]。

本研究结果还存在一些不确定性,未来可进一步完善:(1)本研究中生态系统服务供需评估的一些方法还可改进,比如基于生态空间的占比评估休闲娱乐服务的供给量,未考虑到生态空间的服务半径和可达性因素;(2)采用等权重叠加 4 种生态系统服务供需量的方式评估综合供需水平,可能忽略了区域生态系统服务的主体功能,未来研究应区分不同生态系统服务的重要性权重。

4.2 结论

(1)上海市生态系统服务供给和需求均表现出显著的空间异质性,高供给区主要分布在生态资源丰富的郊区,高需求区集中在人口稠密的中心城区;(2)上海市生态系统服务供需关系的空间分异具有明显的尺度依赖性,随尺度扩大内部细节性的供需关系被掩盖,1500 m 网格尺度和街镇尺度是生态安全格局构建与优化的参考尺度;(3)生态源地在研究区西部和北部密集分布,生态廊道整体呈网状分布特征,生态夹点和生态障碍点主要分布在中心城区以外区域;(4)在生态安全优化模式中,上海市 221 个街镇可分为生态协调区、生态保育区、生态改良区、生态控制区和生态修复区。

参考文献 (References):

- [1] Zhang Z M, Peng J, Xu Z H, Wang X Y, Meersmans J. Ecosystem services supply and demand response to urbanization: a case study of the Pearl River Delta, China. *Ecosystem Services*, 2021, 49: 101274.
- [2] Wood S L R, Jones S K, Johnson J A, Brauman K A, Chaplin-Kramer R, Fremier A, Girvetz E, Gordon L J, Kappel C V, Mandle L, Mulligan M, O'Farrell P, Smith W K, Willemsen L, Zhang W, DeClerck F A. Distilling the role of ecosystem services in the Sustainable Development Goals. *Ecosystem Services*, 2018, 29: 70-82.
- [3] Kang J M, Zhang X, Zhu X W, Zhang B L. Ecological security pattern: a new idea for balancing regional development and ecological protection. A case study of the Jiaodong Peninsula, China. *Global Ecology and Conservation*, 2021, 26(1): e01472.
- [4] 易丹,肖善才,韩逸,欧名豪. 生态系统服务供给和需求研究评述及框架体系构建. *应用生态学报*, 2021, 32(11): 3942-3952.
- [5] 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.
- [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,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.
- [8] 于成龙,刘丹,冯锐,唐权,郭春玲. 基于最小累积阻力模型的东北地区生态安全格局构建. *生态学报*, 2021, 41(1): 290-301.
- [9] 彭建,李慧蕾,刘焱序,胡熠娜,杨旸. 雄安新区生态安全格局识别与优化策略. *地理学报*, 2018, 73(4): 701-710.
- [10] 陈昕,彭建,刘焱序,杨旸,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.

- [11] 胡其玉, 陈松林. 基于生态系统服务供需的厦漳泉地区生态网络空间优化. 自然资源学报, 2021, 36(2): 342-355.
- [12] Zhang Y L, Zhao Z Y, Fu B J, Ma R M, Yang Y Y, Lü Y H, Wu X. Identifying ecological security patterns based on the supply, demand and sensitivity of ecosystem service: a case study in the Yellow River Basin, China. *Journal of Environmental Management*, 2022, 315: 115158.
- [13] 杜文武, 任超群, 张志杰, 骆畅. 基于生态系统服务供需的重庆市主城区生态安全格局构建. 园林, 2022, 39(3): 30-38.
- [14] 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.
- [15] Niu X N, Ni H, Ma Q, Wang S X, Zong L L. Identifying ecological security patterns based on ecosystem service supply and demand using remote sensing products (case study: the Fujian delta urban agglomeration, China). *Sustainability*, 2022, 15(1): 578.
- [16] 高娜, 原野, 赵艺芳. 基于生态系统服务供需的农牧交错带流域生态修复分区——以桑干河上游为例. 环境工程技术学报, 2023, 13(3): 1214-1222.
- [17] 韩增林, 刘澄浩, 闫晓露, 李欣媛, 王学哲. 基于生态系统服务供需匹配与耦合协调的生态管理分区——以大连市为例. 生态学报, 2021, 41(22): 9064-9075.
- [18] 吴平, 林浩曦, 田璐. 基于生态系统服务供需的雄安新区生态安全格局构建. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(9): 5-11.
- [19] 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.
- [20] 徐新良. 中国 30m 逐年 NDVI 最大值数据集. 资源环境科学数据注册与出版系统. (<http://www.resdc.cn/DOI>), 2022.
- [21] 韩宝龙, 欧阳志云. 城市生态智慧管理系统的生态系统服务评估功能与应用. 生态学报, 2021, 41(22): 8697-8708.
- [22] Deng C X, Liu J Y, Liu Y J, Liu Z W, Nie X D, Hu X Q, Wang L X, Zhang Y T, Zhang G Y, Zhu D M, Xiao L H. Spatiotemporal dislocation of urbanization and ecological construction increased the ecosystem service supply and demand imbalance. *Journal of Environmental Management*, 2021, 288: 112478.
- [23] Xiang H X, Zhang J, Mao D H, Wang Z M, Qiu Z Q, Yan H Q. Identifying spatial similarities and mismatches between supply and demand of ecosystem services for sustainable Northeast China. *Ecological Indicators*, 2022, 134: 108501.
- [24] Xin R H, Skov-Petersen H, Zeng J, Zhou J H, Li K, Hu J Q, Liu X, Kong J W, Wang Q W. Identifying key areas of imbalanced supply and demand of ecosystem services at the urban agglomeration scale: a case study of the Fujian Delta in China. *The Science of the Total Environment*, 2021, 791: 148173.
- [25] 王成, 唐宁. 重庆市乡村三生空间功能耦合协调的时空特征与格局演化. 地理研究, 2018, 37(6): 1100-1114.
- [26] 申嘉澍, 李双成, 梁泽, 王玥瑶, 孙福月. 生态系统服务供需关系研究进展与趋势展望. 自然资源学报, 2021, 36(8): 1909-1922.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 林文豪, 温兆飞, 吴胜军, 毕月. 成渝地区双城经济圈生态安全格局识别及改善对策. 生态学报, 2023, 43(3): 973-985.
- [30] 屠越. 上海市生态源地识别体系构建与生态保护修复关键区识别[D]. 上海: 华东师范大学, 2021.
- [31] McRae B H, Hall S A, Beier P, Theobald D M. Where to restore ecological connectivity? Detecting barriers and quantifying restoration benefits. *PLoS One*, 2012, 7(12): e52604.
- [32] 马才学, 杨蓉荃, 柯新利, 马智宇. 基于生态压力视角的长三角地区生态安全格局构建与优化. 长江流域资源与环境, 2022, 31(1): 135-147.
- [33] 熊昕莹, 孟梅. 基于生态系统服务供需关系及空间流动的新疆生态管理分区与优化策略. 应用生态学报, 2023, 34(8): 2237-2248.
- [34] 任国平, 刘黎明, 李洪庆, 袁承程. 都市郊区乡村景观多功能权衡-协同关系演变. 农业工程学报, 2019, 35(23): 273-285.
- [35] Chen H, Yan W T, Li Z H, Wende W, Xiao S L, Wan S L, Li S J. Spatial patterns of associations among ecosystem services across different spatial scales in metropolitan areas: a case study of Shanghai, China. *Ecological Indicators*, 2022, 136: 108682.
- [36] 荣月静, 严岩, 赵春黎, 朱婕缘, 郑天晨, 王辰星, 卢慧婷, 章文. 基于生态系统服务供需的景感尺度特征分析和应用. 生态学报, 2020, 40(22): 8034-8043.
- [37] 屠越, 刘敏, 高婵婵, 孙彦伟, 蔡超琳, 苏玲. 大都市区生态源地识别体系构建及国土空间生态修复关键区诊断. 生态学报, 2022, 42(17): 7056-7067.
- [38] 闫玉玉, 孙彦伟, 刘敏. 基于生态安全格局的上海国土空间生态修复关键区域识别与修复策略. 应用生态学报, 2022, 33(12): 3369-3378.
- [39] 谢余初, 张素欣, 林冰, 赵银军, 胡宝清. 基于生态系统服务供需关系的广西县域国土生态修复空间分区. 自然资源学报, 2020, 35(1): 217-229.
- [40] 岳文泽, 侯丽, 夏皓轩, 韦静娴, 卢有朋. 基于生态系统服务供需平衡的宁夏固原生态修复分区与优化策略. 应用生态学报, 2022, 33(1): 149-158.