

DOI: 10.20103/j.stxb.202312312884

邓丽明, 杨骥, 尹小玲, 贾凯, 孙嘉, 舒思京, 黄爱琳. 粤港澳大湾区生态系统服务供需关系及其对城市化多空间尺度的响应. 生态学报, 2024, 44(20): 9094-9107.

Deng L M, Yang J, Yin X L, Jia K, Sun J, Shu S J, Huang A L. Supply and demand of ecosystem services and its multi-spatial scale response to urbanization in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(20): 9094-9107.

粤港澳大湾区生态系统服务供需关系及其对城市化多空间尺度的响应

邓丽明¹, 杨骥¹, 尹小玲^{1,2,*}, 贾凯¹, 孙嘉², 舒思京¹, 黄爱琳^{1,3}

¹ 广东省科学院广州地理研究所 广东省遥感与地理信息系统应用重点实验室/广东省地理空间信息技术与应用公共实验室, 广州 510070

² 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458

³ 上海海洋大学 海洋生态与环境学院, 上海 201306

摘要: 城市化与生态系统服务供需相互作用关系在不同空间尺度下具有显著差异性。基于供需空间不匹配视角揭示生态系统服务对城市化的多尺度响应规律是实现城市可持续发展的重要前提条件。研究从 1 km×1 km、2.5 km×2.5 km、5 km×5 km、10 km×10 km、区县域和市域等 6 个空间尺度分析了 2020 年粤港澳大湾区生境质量服务、固碳服务和土壤保持服务供需关系和空间分异规律, 并探究不同空间尺度生态系统服务供需关系对城市化的响应。结果表明: (1) 生态系统供需错配集中分布在中心城区, 空间尺度的增加加剧了中心城区的赤字程度。(2) 城市化指数与生态系统服务供需比率在多空间尺度上均呈负相关关系。随着空间尺度增加, 高城市化-生态系统服务赤字型逐渐向中心城区延伸, 低城市化-生态系统服务盈余型向非城市化地区聚集。(3) 在 10 km 和区县尺度上, 生态系统服务供需对城市化响应最为剧烈, 是解决二者不平衡发展的最佳尺度。本研究为高度城市化地区相关管理部门提供优化生态系统服务供需平衡的保护管理政策制定提供科学依据。

关键词: 生态系统服务; 供需关系; 城市化; 尺度效应; 粤港澳大湾区

Supply and demand of ecosystem services and its multi-spatial scale response to urbanization in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

DENG Liming¹, YANG Ji¹, YIN Xiaoling^{1,2,*}, JIA Kai¹, SUN Jia², SHU Sijing¹, HUANG Ailin^{1,3}

¹ Guangdong Provincial Key Laboratory of Remote Sensing and Geographical Information System/Guangdong Open Laboratory of Geospatial Information Technology and Application, Guangzhou Institute of Geography, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China

² Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China

³ College of Oceanography and Ecological Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: The interaction between urbanization and the supply and demand of ecosystem services exhibits significant differences at various spatial scales. Understanding the multi-scale response of ecosystem services to urbanization through supply-demand spatial mismatch is crucial for sustainable urban development. This study conducted a comprehensive analysis of habitat quality services, carbon sequestration services, and soil conservation services within the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area in 2020, across six spatial scales: 1 km×1 km, 2.5 km×2.5 km, 5 km×5 km, 10 km×10 km, county-level, and city-level. Furthermore, our investigation delved into the response of ecosystem service supply and demand relationships to urbanization. The results indicated that: (1) the central urban area showed a clear mismatch between ecosystem supply and demand, with the deficit worsening as the spatial scale expanded. (2) There was a negative

基金项目: 广东省自然科学基金(2024A1515012223); 国家重点研发计划(2022YFF0711602); 国家自然科学基金(42201379); 广东省海洋经济发展专项项目(GDNRC[2024]35)

收稿日期: 2023-12-31; **网络出版日期:** 2024-07-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yinxl@gdas.ac.cn

correlation between urbanization index and the supply-demand ratio of ecosystem services at multiple spatial scales. As the spatial scale increases, the HL type extended towards the central urban area, while the LH type gathered in non-urbanized areas. (3) At the 10 km and district/county scales, the supply-demand of ecosystem services exhibited the most pronounced response to urbanization. These scales signaled the optimal scales for addressing the observed imbalance. This study provides a scientific basis for formulating protection and management policies to optimize the balance between the supply and demand of ecosystem services in highly urbanized areas.

Key Words: ecosystem services; supply and demand relationship; urbanization; scale effect; Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

城市化地区生态系统服务供需存在显著的不匹配矛盾,这种供需错配矛盾伴随着城市化的快速发展愈发严重^[1]。一方面,城市化改变了地表自然生态系统的结构、过程和功能从而降低生态系统服务供给能力^[2]。目前大部分生态系统服务功能都存在退化甚至消失的风险,包括生物多样性减少、土壤侵蚀加剧和温室效应增加等^[3-4]。另一方面,伴随着城市人口增长和经济活动强度增强导致人类对生态系统服务的需求逐渐增高,生态系统服务供给已经无法满足人类社会发展需求^[5]。平衡退化的生态系统服务与持续增长的人类需求之间的矛盾,已经成为当下人与自然协调发展的挑战之一^[6]。

城市化地区生态系统服务供需关系研究聚焦生态系统服务供需空间匹配和相互影响机制研究等^[7-8]。Yang 等^[9]基于 Pearson 相关性、随机森林和局部空间自相关等方法分析长三角地区城市化对典型生态系统服务供需的影响关系,结果显示城市化与生态系统服务供需比间存在显著的负相关性。凌云等^[10]基于双变量局部空间自相关探究了京津冀地区城市化对生态系统服务供需的影响特征,研究表明城市化发展与生态系统服务供需比的错配特征具有显著差异。Pan 等^[11]利用地理加权回归模型,探讨了生态系统服务供需比对不同类型城市化的空间异质性反应,表明 2000 年和 2015 年中国东南部人口城市化对供需比产生了显著的积极影响。然而,目前大多数研究聚焦在特定单一空间尺度上,较少关注生态系统服务供需在不同空间尺度上的综合分析,无法全面揭示生态系统服务供需与城市化间的相互关系^[12]。

近年来,生态系统服务对城市化响应尺度效应研究受到广泛关注,主要聚焦于生态系统服务供给侧,从供需空间匹配角度的研究较少。荣月静等^[13]基于“社区-城市-流域-区域”的多尺度景感分析框架,将景感要素与生态系统服务供需思想融入城市规划,并在雄安新区开展应用研究。Larondelle 和 Lauf^[14]研究发现德国柏林生态系统服务供需在市域尺度上匹配,但在街区或社区尺度上却不匹配。Zhao 等^[15]基于不同空间尺度上进行生态系统服务供需平衡与土地利用类型比例的回归分析,表明川滇生态屏障生态系统服务供需在乡镇和 1 km×1 km 网格尺度对土地利用变化较为敏感。因此,明确不同空间尺度上生态系统服务供需匹配特征,厘清城市化与生态系统服务供需间相互作用关系是优化城市化地区生态系统服务供需平衡的关键。

综上所述,本研究分析了 2020 年粤港澳大湾区生境质量服务、固碳服务和土壤保持服务供需不匹配特征,并探究不同空间尺度上城市化与生态系统服务供需之间的尺度效应。主要研究内容包括三方面:(1)构建生态系统服务供需比率分析大湾区生态系统服务供需不匹配空间特征;(2)基于冷热点分析探究生态系统服务供需多空间尺度效应特征;(3)通过双变量空间自相关分析和相关性分析揭示不同空间尺度下生态系统服务供需对城市化响应的空间和强度特征。

1 研究区与数据源

1.1 研究区概况

粤港澳大湾区位于中国华南沿海(21°25'—24°30'N, 111°12'—115°35'E),由香港、澳门两个特别行政区和广东省广州、深圳、珠海、佛山、惠州、东莞、中山、江门、肇庆九个城市组成,总面积约 5.6 万 km²(图 1)。

粤港澳大湾区是世界四大湾区之一,也是中国经济贡献最大的三大城市群之一。2020 年常住人口

8617 万人, GDP 总额为 1.67 万亿美元, 已超过加拿大, 在全球 GDP 中排名第九^[16]。城市化快速发展导致大湾区的生态系统供需严重失衡, 人地矛盾突出^[17-18]。

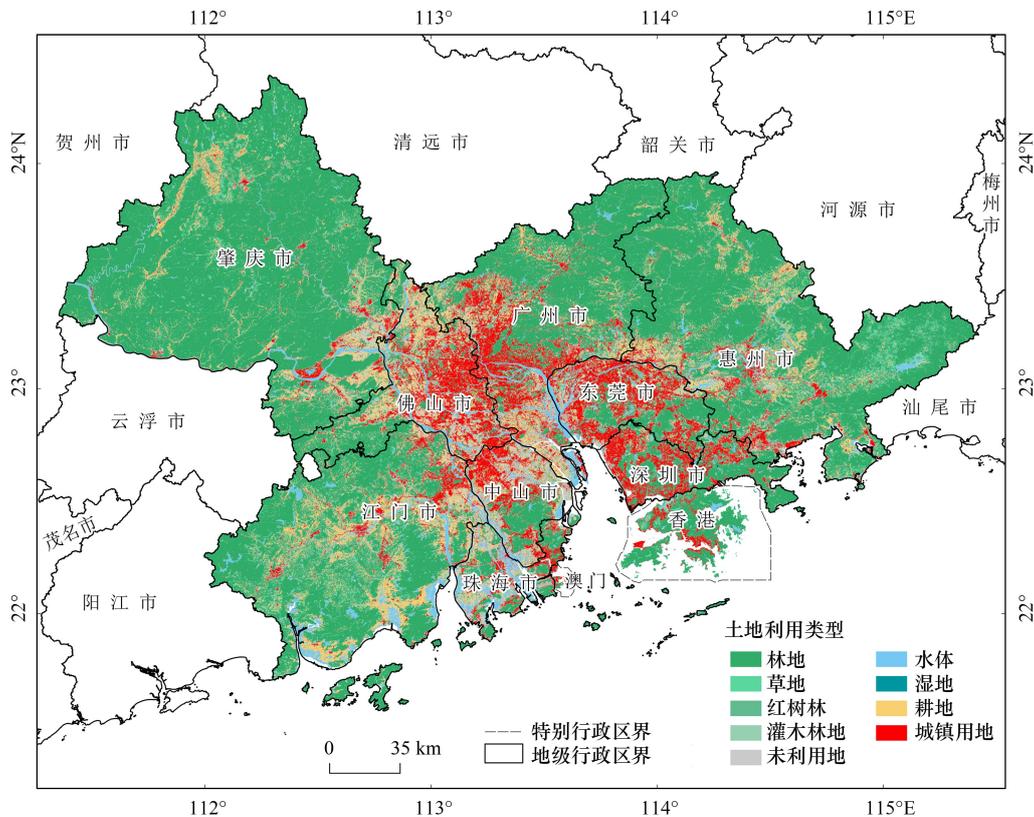


图 1 粤港澳大湾区地理位置与土地利用/覆被类型

Fig.1 Geographical location and land use/cover types in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

1.2 数据来源及处理

本研究涉及的自然地理数据包括土地利用/土地覆被、DEM 高程、土壤、降水、夜间灯光和植被覆盖数据等(表 1); 社会经济数据包括中国人口空间分布公里网格数据集、GDP 和能源消耗量等。2020 年土地利用/土地覆被分为林地、草地、红树林、灌木林地、水体、湿地、耕地、城镇用地和未利用地 9 类, 分辨率为 10 m, 来源于欧洲航天局(<https://viewer.esa-worldcover.org/worldcover>)。高程数据反映了分辨率为 30 m 的大湾区地形特征, 来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>)。土壤数据包括砂粒、粉粒、黏粒和有机碳等含量, 来源于世界土壤数据库(HWSD)(<https://data.tpdc.ac.cn/>)中的中国土壤数据集, 空间分辨率为 1 km。降水量数据为大湾区 2020 年年平均降雨量, 空间分辨率为 1 km, 来源于中国地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>)。归一化植被指数(NDVI)来源于 MODIS 遥感卫星 MOD13Q1 数据集(<https://lpdaac.usgs.gov/>), 采用最大值合成法得到的植被指数数据集, 空间分辨率为 1 km。夜间灯光数据空间分辨率为 130 m, 来源于珞珈一号(<http://59.175.109.173:8888/app/login.html>)。大湾区 2020 年人口密度数据空间分辨率为 1 km, 来源于世界人口数据集(<https://www.worldpop.org/>)。GDP 和能源消耗栅格数据集基于 2020 年粤港澳大湾区各市统计年鉴, 综合考虑土地利用、夜间灯光指数和其他遥感信息后, 将 GDP 和能源消耗密度统计数据通过插值降尺度到 1 km×1 km 的网格上。

2 研究方法

为揭示多尺度生态系统服务供需关系对城市化发展的响应规律, 本研究基于网格尺度和行政尺度设置了

6 种空间尺度。在空间尺度构建基础上,结合大湾区生态系统服务供需评估,采用空间冷热点分析法探究生态系统服务供需关系多空间尺度效应。结合大湾区城市化指数,通过双变量空间自相关分析和相关性分析揭示生态系统服务供需关系对城市化的空间响应和强度特征。

表 1 数据来源

Table 1 Data sources

数据类型 Data type	空间分辨率 Spatial resolution	来源 Sources
土地利用/土地覆被类型 Landuse/cover type	10 m	欧洲航天局 (https://viewer.esa-worldcover.org/worldcover)
高程 Elevation	30 m	地理空间数据云 (https://www.gscloud.cn/)
土壤类型 Soil type	1 km	世界土壤数据库 (https://data.tpdc.ac.cn/)
降水量 Precipitation	1 km	中国地球系统科学数据中心 http://www.geodata.cn/
归一化植被指数 Normal difference vegetation Index	1 km	MODIS 遥感卫星 MOD13Q1 数据集 (https://lpdaac.usgs.gov/)
夜间灯光 Night light	130 m	珞珈一号 (http://59.175.109.173:8888/app/login.html)
人口密度 Population density	1 km	世界人口数据集 (https://www.worldpop.org/)
GDP 和能源消耗 GDP and energy consumption	—	2020 年粤港澳大湾区各市统计年鉴

2.1 空间尺度梯度构建

研究选取了行政尺度和网格尺度进行粤港澳大湾区生态系统服务供需关系尺度效应分析。行政尺度作为宏观管理尺度,不同行政尺度生态系统服务供需关系研究,有利于缓解不同等级行政单元之间生态系统服务管理及政策制定冲突^[19-20]。网格尺度作为微观尺度,能够充分反映生态系统服务供需不匹配特征,这是由于城市化对生态系统服务供需的直接影响通常发生在微观尺度^[21]。

由于数据的可获取性,行政尺度选择市域尺度和区县尺度。根据大湾区区域面积(5.6 万 km²),参考相关研究区域^[22-23],将网格尺度梯度设置在 1 km×1 km 至 10 km×10 km 之间。其中 10 km×10 km 网格尺度与大湾区乡镇尺度相配,实现了网格尺度向行政尺度的过渡^[24]。此外,考虑到大湾区各区县面积大小差异性,还设置了 2.5 km×2.5 km 和 5 km×5 km 网格尺度。

综上所述,本研究利用 Arc GIS 的渔网分析将和分区统计工具在研究区内构建了 1 km×1 km、2.5 km×2.5 km、5 km×5 km、10 km×10 km、区县和市域共计 6 种空间尺度梯度。

2.2 生态系统服务供需空间不匹配分析方法

针对粤港澳大湾区生境破碎、过度碳排放和局部严重的水土流失等生态环境问题,以及城市群高密度人口和经济快速发展双重重压,并根据大湾区可持续性发展需求,选定了 2020 年大湾区生境质量服务、固碳服务和土壤保持服务 3 项具有重要生态功能的生态系统服务作为研究对象,研究粤港澳大湾区供需关系多尺度效应及其对城市化的响应特征。

2.2.1 生态系统服务供给核算

生态系统服务供给相关核算方法参见表 2。

(1) 生境质量服务是指在一定时空范围内生态系统能够提供给适宜个体与种群持续发展和生存条件的能力^[6]。生境是指生物个体、种群、群落完成生存、繁殖等生命活动的空间的总范围,而土地作为生境的载体,因此某一种土地利用类型又可定义为生境^[15]。一般来说,受人类活动干扰越弱的,能够满足生物长期稳定栖息和活动的地类,其生境质量服务值越高,如林地、草地和水域等^[10]。InVEST 模型中生境质量模块可用于量化生境质量服务供给。将城镇用地、耕地和未利用地设置为威胁源。综合生境类型敏感性和威胁因子,得到生境质量服务供给指数(Q_{sj})。

(2) 固碳服务供给采用 InVEST 模型中的碳储存模块量化。该模块将每一种土地利用类型的碳储存分成四种基本碳库:地上生物量、地下生物量、土壤和凋落物。根据 Zhang 等关于大湾区碳密度相关实证研究,采

用其修正后的参数进行固碳服务供给估算^[25]。将不同土地利用类型下的各种碳储集层相加,得到时间 t 内每个像素单位 x 的碳储量(C_{xt})。

表 2 生态系统服务供给核算方法

Table 2 Methods of ecosystem services supply accounting

类型 Category	计算方法 Accounting methods	变量 Variables
生境质量服务供给 The supply of habitat quality	$Q_{xj} = H_{xj} \left(1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^2} \right) \right)$ (1)	(1) Q_{xj} 指生境质量指数; H_{xj} 表示生境适宜程度, k 为半饱和系数, k 值设置为栅格分辨率的一半; z 一般设置为 2.5。 D_{xj} 为景观类型 j 中栅格 x 的生境退化度; w_r 为不同威胁因子的权重; r_y 为威胁因子强度; β_x 为生境抗干扰的水平; S_{jr} 为不同生境对不同威胁因子的敏感程度。 i_{rxy} 栅格 y 中的威胁因子 r 对栅格 x 的影响; d_{xy} 是栅格 x 和 y 之间的线性距离; d_{\max} 是威胁 r 的最大作用距离。威胁因子影响范围以及生境类型对威胁因子的敏感性参见文献 ^[25] 。
	$D_{xj} = \sum_{r=1}^r \sum_{y=1}^y \left(\frac{w_r}{\sum_{r=1}^r w_r} \right) r_y i_{rxy} \beta_x S_{jr}$ (2)	
	$i_{rxy} = \begin{cases} 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{\max}} \right) \\ \exp \left[- \left(\frac{2.99}{d_{\max}} \right) \times d_{xy} \right] \end{cases}$ (3)	
固碳服务供给 The supply of carbon sequestration	$C_{xt} = \sum_{i=1}^N A_{xjt} (C_{aj} + C_{bj} + C_{sj} + C_{oj})$ (4)	(2) A_{xjt} 为像元 x 中土地覆被类型 j 的面积。 C_{aj} 、 C_{bj} 、 C_{sj} 和 C_{oj} 分别代表土地利用类型 j 的地上生物碳库、地下生物碳库、土壤碳库和死亡有机物碳库的碳密度 (Mg/hm^2)。研究区土地利用碳密度数据及修正方法参见文献 ^[26] 。
土壤保持服务供给 The supply of soil retention	$SR = \text{RKLS} - \text{USLE}$ (5)	(3) SR 为土壤保持量 ($\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$), RKLS 为土壤潜在侵蚀量 ($\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。 USLE 为土壤实际侵蚀量 ($\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。 R 为降水侵蚀性因子 ($\text{MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$), K 为土壤侵蚀性因子 ($\text{t hm}^2 \text{ h hm}^{-2} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$), LS 为坡度坡长因子, C 为植被覆盖与管理因子 ^[27-28] 。 P 为水土保持措施因子 ^[29] 。
	$\text{RKLS} = R \times K \times LS$ (6)	
	$\text{USLE} = R \times K \times LS \times C \times P$ (7)	

(3) 土壤保持供给服务采用土壤保持量进行表征^[27]。综合考虑规模、模型复杂性和数据可获得性,采用通用土壤流失方程(RUSLE)估算土壤侵蚀量,并基于潜在土壤侵蚀与实际土壤侵蚀的差值得到土壤保持量(SR)。

2.2.2 生态系统服务需求核算

生态系统服务需求相关核算方法参见表 3。

表 3 生态系统服务需求核算方法

Table 3 Methods of ecosystem services demand accounting

类型 Category	计算方法 Accounting methods	变量 Variables
生境质量服务需求 The demand of habitat quality	$\text{SBD}_i = \lg(PD_i \times \text{PBL}_i \times \text{NLI}_i)$ (8)	(1) SBD_i 代表区域 i 对生境质量服务的需求, PD_i 、 PBL_i 和 NLI_i 分别代表城镇 i 的人口密度、建成区土地比例和夜间灯光强度。
固碳服务需求 The demand of carbon sequestration	$D_i = C_{ei} \times P_i \times C_{\text{transfer}}$ (9)	(2) D_i 为像素 i 对固碳服务 (t/hm^2) 的需求; C_{ei} 为像素 i 的人均能耗(包括煤、汽油、煤油、柴油、液化石油气和电力),均转换为标准煤(10000 t); P_i 为像素 i 的人口密度 ($\text{人}/\text{hm}^2$); C_{transfer} 转为能源消耗的碳排放转化率,为 0.67 ^[30] 。
土壤保持服务需求 The demand of soil retention	$\text{USLE} = R \times K \times LS \times C \times P$ (10)	(3) USLE 为实际侵蚀量 ($\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。 R 为降水侵蚀性因子 ($\text{MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$), K 为土壤侵蚀性因子 ($\text{t hm}^2 \text{ h hm}^{-2} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$), LS 为坡度坡长因子, C 为植被覆盖与管理因子, P 为水土保持措施因子。

(1) 生境质量服务需求(SBD_i)采用三个常用的社会经济指标来表征,即人口密度、城镇用地面积占比和夜间灯光强度^[31]。人口密度代表生境质量服务受益数量。城镇用地面积比例表示生境质量服务需求强度。夜间灯光强度是社会经济发展水平的一个有用的替代指标,可以有效地反映人们对生境质量服务的偏好。

(2) 固碳服务需求 (D_i) 采用碳排放系数法进行估算, 是由联合国政府间气候变化委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change) 提出的一种碳排放计算方法, 指每一种能源或使用中能源产生的碳排放数量^[32]。

(3) 土壤保持服务需求量即为人类期望获得土壤保持量, 而实际的土壤侵蚀量则是人类期望能够被治理的和保持住的土壤量^[33]。这是由于当土壤发生侵蚀时, 农业生产、交通运输、饮用水安全甚至人类生命安全等均可能会受到较大威胁, 因此人类期望侵蚀土壤能够通过治理而被保持住, 进而在不发生侵蚀。所以土壤侵蚀量可以很好地反映人类对土壤保持服务的需求。因此, 以实际的土壤侵蚀量 (USLE) 作为土壤保持服务的需求量。

2.2.3 生态系统服务供需比率

采用供需比率 (R_{ESD}) 量化分析生态系统服务供需平衡关系, 揭示研究区域生态系统服务供给和需求在数量和空间上的盈余或赤字^[34-35]。当 R_{ESD} 为正时, 表示生态系统服务盈余; 当 R_{ESD} 为零时, 表示生态系统服务供需平衡; 当 R_{ESD} 为负时, 表示生态系统服务赤字。 R_{ESD} 的计算公式为:

$$R_{ESD} = \frac{S_i - D_i}{S_i + D_i} \quad (11)$$

采用归一化方法对生态系统服务供给数据和需求数据进行标准化计算; S_i 和 D_i 分别为研究区域生态系统服务的供给值与需求值。

2.3 生态系统服务供需尺度效应分析

本研究利用空间冷热点分析方法确定生态系统服务盈余赤字聚集特征^[36]。空间冷热点分析是用于识别在空间上有显著高低值的空间聚类的方法, 高值聚类区为热点, 低值聚类区为冷点。在空间统计中, G_i^* 系数是一种基于距离全矩阵的局部空间自相关指标, 以探查各类统计数据在空间上分布的高低值聚类位置。计算公式如下:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \bar{x} \sum_{j=1}^n w_{ij}}{\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - \bar{x}^2} \sqrt{\frac{[n(\sum_{j=1}^n w_{ij} w_{ij}) - (\sum_{j=1}^n w_{ij})^2]}{n-1}}} \quad (12)$$

式中, w_{ij} 为斑块 i 与斑块 j 之间的空间权重矩阵, x_j 为斑块 j 的属性值, \bar{x} 为所有属性值的平均值, n 为总的斑块数。当计算结果为 $G_i^* > 0$ 时, 该区域为一个高值聚集区, 即一个“热点”。当 $G_i^* < 0$ 时, 该区域为低值聚集区, 即“冷点”。此外, 热点置信度越高代表该区域生态系统服务盈余强度越高; 冷点置信度越高代表该区域生态系统服务赤字强度越高。

2.4 生态系统服务供需对城市化的响应分析

2.4.1 城市化综合指数构建方法

城市化可以通过人口城市化、经济城市化、土地城市化和社会城市化四个维度来确定^[37]。人口增长和经济发展是城市化的基础, 城镇用地扩张是城市化的空间表现, 社会城市化主要体现在人类生活方式的方便。然而, 社会城市化数据获取困难, 且难以在空间上进行限定。因此, 本研究选择人口密度、GDP 密度和建设用地比例等三个指标构建粤港澳大湾区城市化综合指数 (CUI)^[27]。其中, 人口密度量化人口城市化、GDP 密度量化经济城市化和城镇用地比例量化土地城市化。由于这三个指标的空间分布高度相似, 因此在计算城市化综合指数之前需要对每个像元内的三个指标进行标准化。则 CUI 计算公式如下:

$$CUI = \frac{1}{3} (PU' + EU' + LU') \quad (13)$$

式中, PU' 为人口城市化标准化值, EU' 为经济城市化标准化值, LU' 为土地城市化标准化值。

2.4.2 生态系统服务供需响应空间分析方法

通过双变量空间自相关分析生态系统服务供需不匹配空间特征对城市化的响应^[38]。双变量空间自相关包括全局空间自相关和局部空间自相关,全局空间自相关用来检验生态系统服务供需比率与城市化之间是否存在空间相关性以及相关的程度,局部空间自相关用来检验不同空间位置上存在的空间相关模式。公式如下:

$$I_G = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq 1}^n w_{ij} z_i^e z_j^u}{(n-1) \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq 1}^n w_{ij}} \quad (14)$$

$$I_L = z_i^e \sum_{j=1}^n w_{ij} z_j^u \quad (15)$$

式中, I_G 为全局双变量莫兰指数(Moran's I), I_L 为局部双变量莫兰指数; n 为空间样本数量; w_{ij} 为空间权重矩阵($ij=1, 2, 3, \dots, n$); z_i^e 第*i*个空间单元的生态系统服务供需比率, z_j^u 为第*j*个研究单元的城市化综合指数。

2.4.3 生态系统服务供需响应强度分析方法

采用相关性分析方法分析不同尺度下生态系统服务供需不匹配对城市化的响应^[38]。依据相关系数绝对值的大小判断城市化与生态系统服务供需比率之间相互作用的强弱。具体公式如下:

$$p = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (16)$$

式中: p 为的城市化与生态系统服务供需比率之间的相关系数,值域为 $[-1, 1]$ 。 X 为生态系统服务供需比率; Y 为城市化综合指数。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务供需不匹配空间特征

大湾区生态系统服务供需空间错配明显,呈现外围盈余和中心赤字的空间格局(图2)。生境质量服务供需两极分化,其盈余区和赤字区面积占比分别为79.48%和20.40%。固碳服务盈余区和相对平衡区规模较大,其面积占比分别为87.83%和11.69%。土壤保持服务相对平衡区和赤字区规模较大,其面积占比分别为29.94%和70.04%。

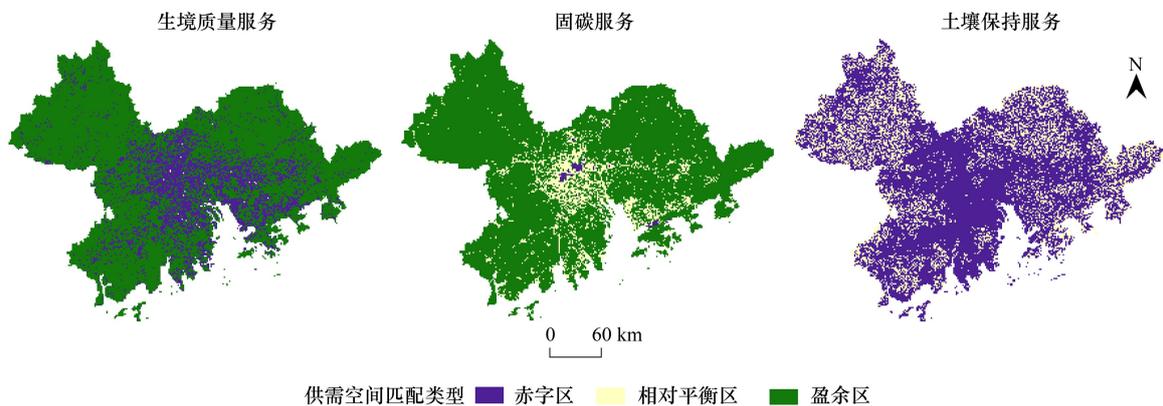


图2 生态系统服务供需关系的空间异质性
Fig.2 The spatial heterogeneity of the ecosystem services supply-demand relationships

3.2 生态系统服务供需尺度效应特征

随着空间尺度增大,大湾区中心城区生态系统服务供需错配越突出(图3)。生态系统服务冷点主要集中在

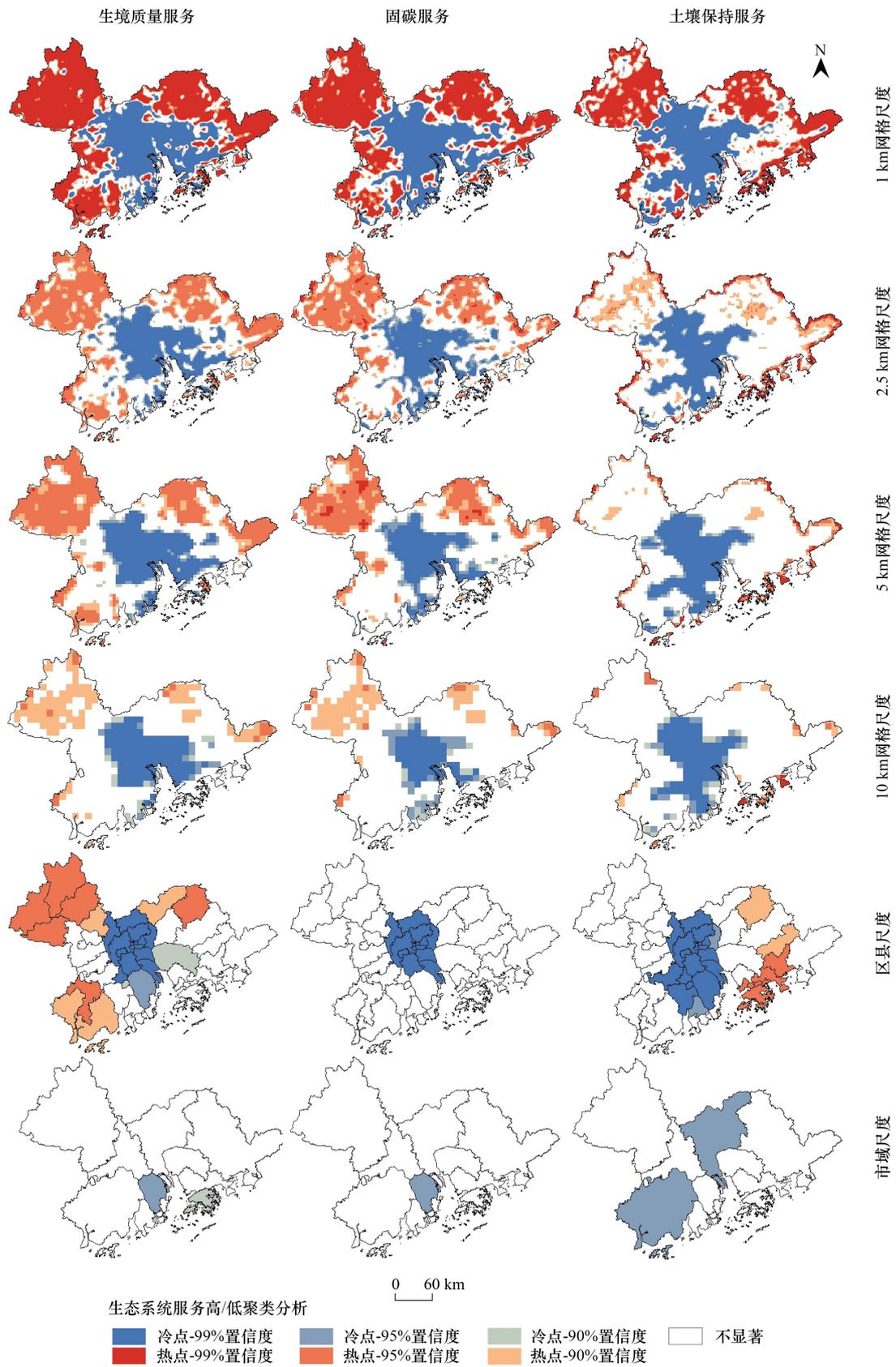


图 3 大湾区多尺度生态系统服务供需比高/低聚类空间分布图

Fig.3 The spatial distribution of the ecosystem services supply-demand ratio G_i^* at multiple scales in the Greater Bay Area

在珠江三角洲地区,冷点面积随尺度增大而逐渐收缩,并向中心城区聚集。99%置信度生境质量服务、固碳服务和土壤保持服务冷点面积占比分别下降了 26.19%、25.61%和 24.63%。生态系统服务热点聚集在外围地区,随着空间尺度增大,逐步向肇庆市和沿海地区聚拢。99%置信度生境质量服务、固碳服务和土壤保持服务热点面积占比分别下降了 47.64%、41.08%和 34.01%。

3.3 生态系统服务供需对城市化的多尺度响应

3.3.1 城市化发展空间结构与尺度效应特征

大湾区城市化发展以珠江三角洲为中心,呈现出城市化水平逐渐向外部递减的空间结构(图 4)。高度城市化区域集中在珠江三角洲地区,其综合指数在 0.18—0.88 之间;中度城市化区域位于城市化发展的过渡地带,其综合指数在 0.1—0.17 之间;非城市化区域主要分布在外围地区,其综合指数在 0—0.09 之间。

高度城市化区域随尺度增加向中心城区聚集,非城市化区域则逐渐分散(图 4)。其中,99%置信度城市化热点面积逐步从 20.94% 下降至 0%;99%置信度城市化冷点面积占比在 1 km 增加至 2.5 km 网格时从 44.39% 骤降至 0%。

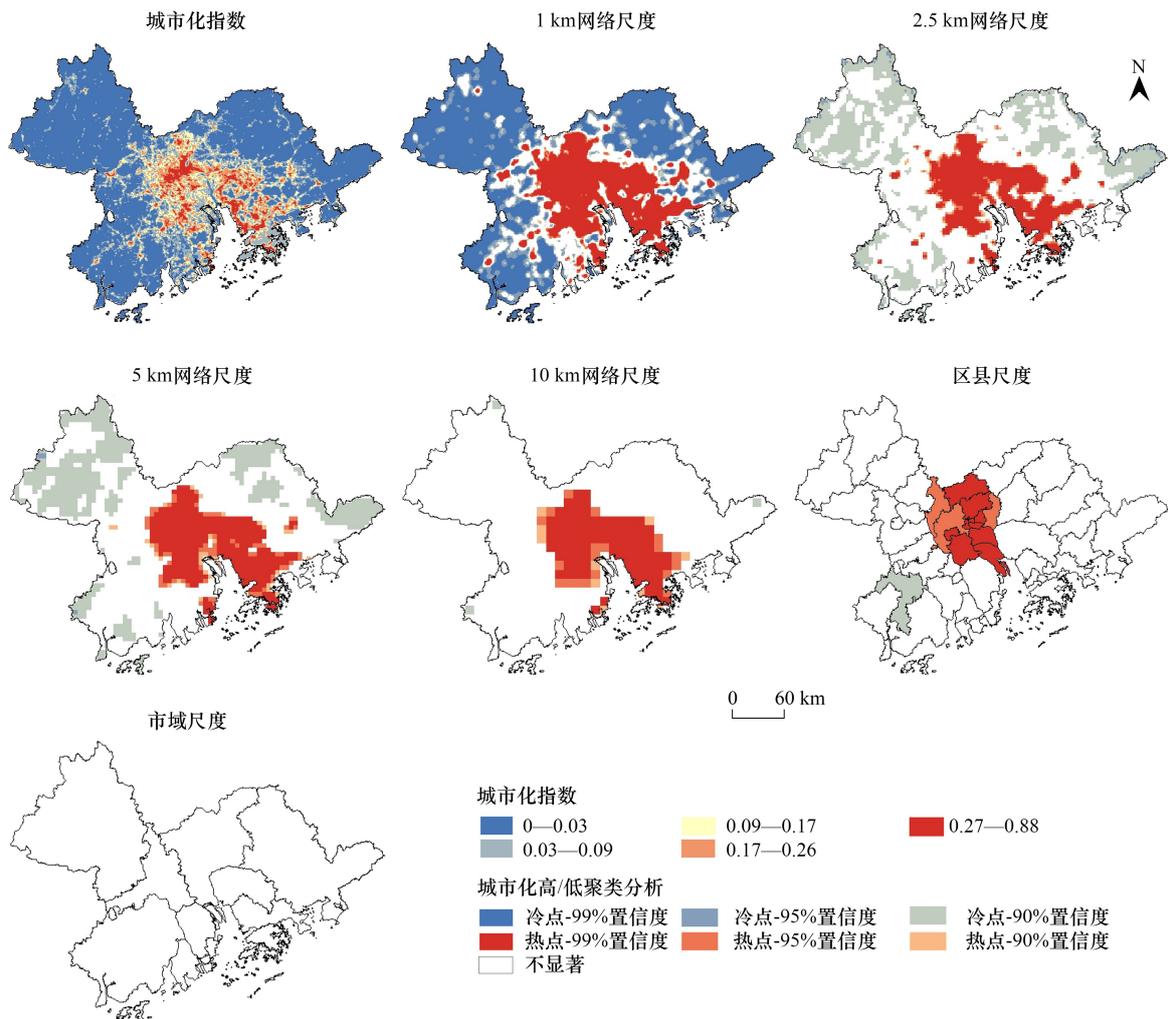


图 4 大湾区城市化指数及其多尺度高/低聚类分析

Fig.4 The urbanization index of Greater Bay Area and its multiscale high/low clustering analysis

3.3.2 生态系统服务供需响应空间特征

大湾区城市化综合指数与生态系统服务供需比之间的 Moran's *I* 指数均小于 0,且在 0.001 水平上显著,证明了大湾区城市化发展会导致生态系统服务供需空间错配。二者局部空间关系主要为 HL 型(高城市化-

生态系统服务赤字)、LH 型(低城市化-生态系统服务盈余)和 LL 型(低城市化-生态系统服务赤字)(图 5)。

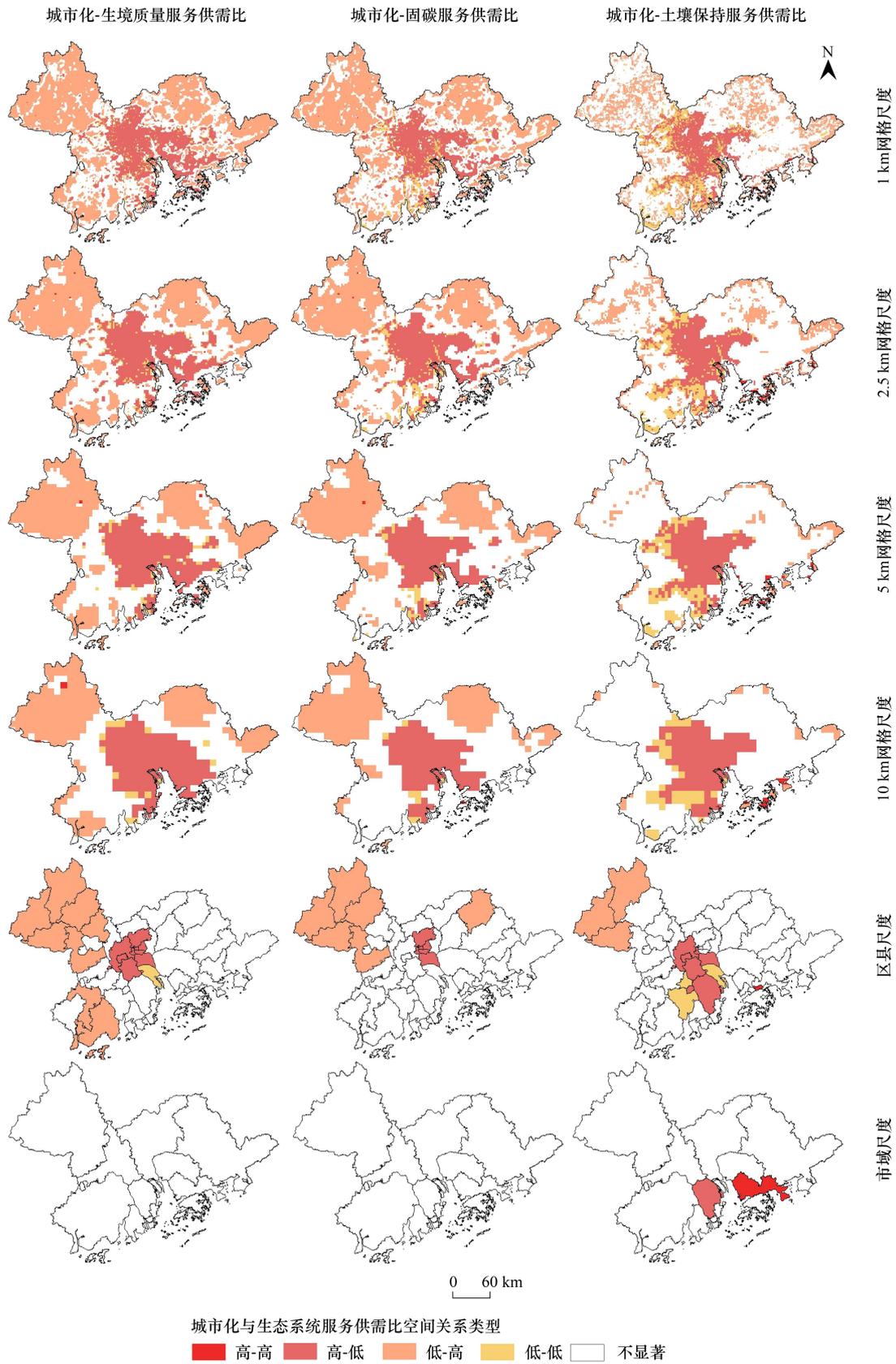


图 5 大湾区多尺度城市化与生态系统供需比之间的双变量空间自相关

Fig.5 Bivariate LISA cluster maps between multi-scale urbanization and ecosystem supply-demand ratio in the Greater Bay Area

高度城市化地区是生态系统服务赤字的典型区域。随空间尺度增加,HL 型逐渐向中心城区延伸。但当尺度超过一定界限,HL 型则急速缩小。从 1 km 网格增大至 10 km 网格时,生境质量服务、固碳服务和土壤保持服务 HL 型面积占比分别上升了 5.55%、3.59%和 7.01%。但从 10 km 网格增大至市域尺度时,HL 型面积占比分别下降了 24.92%、19.52%和 17.58%。

非城市化地区是生态系统服务盈余的主要聚集区。随尺度增加,LH 型向外围地区聚拢,并形成一定规模的生态系统服务供给源地。生境质量服务、固碳服务和土壤保持服务 LH 型面积占比分别下降了 43.14%、39.93%、和 21.38%。

中度城市化地区是 LL 型主要聚集区。随尺度增加,LL 型逐渐向 HL 型靠拢。生境质量服务、固碳服务和土壤保持服务 LH 型面积占比分别下降了 3.40%、5.70%和 9.23%。

此外,大湾区还零散分布着少量的 HH 型(高城市化水平和生态系统服务盈余),并随尺度增加向沿海地区靠拢,表明高度城市化发展并不一定会导致生态系统服务供需赤字。

3.3.3 生态系统服务供需响应强度特征

生态系统服务供需响应强度呈现不同的尺度效应,生境质量服务和土壤保持服务供需在 10 km 网格尺度响应最为剧烈;固碳服务供需在区县尺度响应最为剧烈(图 6)。生境质量服务和土壤保持服务供需与城市化之间的相关系数在 10 km 网格尺度上达到极大值,分别为-0.89 和-0.51;固碳服务供需与城市化之间的相关系数在区县尺度上达到极大值($p = -0.79$)。

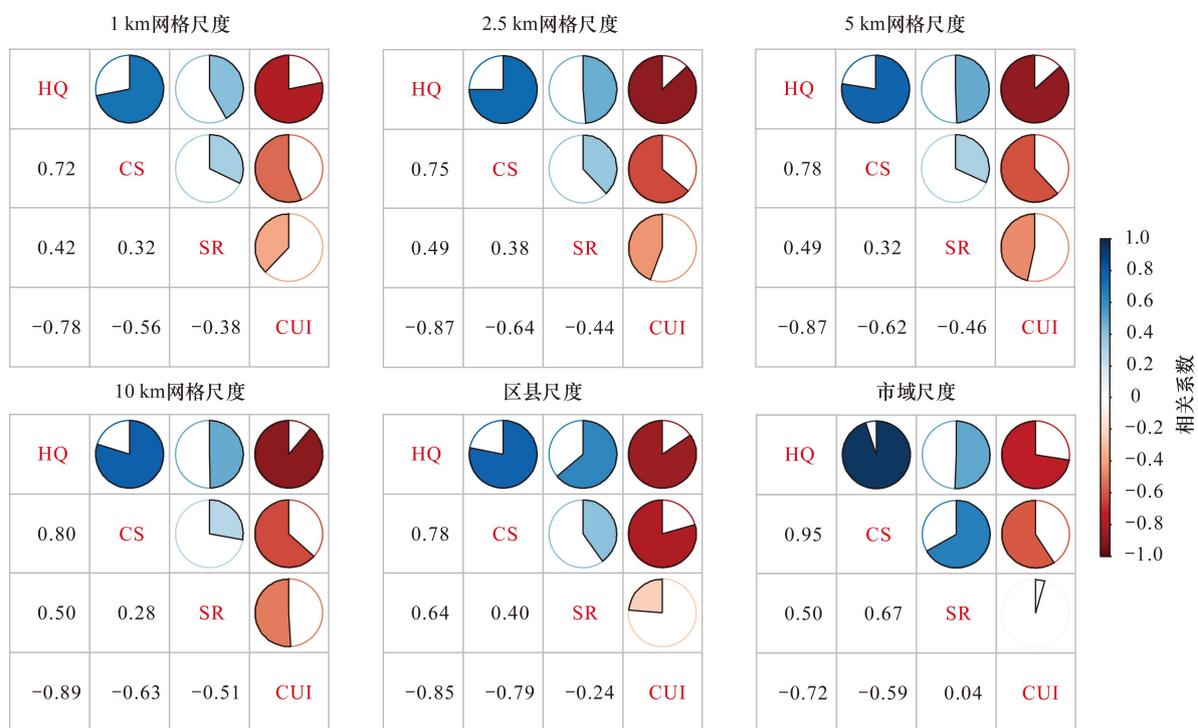


图 6 大湾区多尺度城市化与生态系统供需比之间的相关性分析

Fig.6 Correlation analysis between multi-scale urbanization and ecosystem supply-demand ratio in the Greater Bay Area

HQ:生境质量服务 Habitat quality services; CS:固碳服务 Carbon sequestration services; SR:土壤保持服务 Soil conservation services; CUI:城市化综合指数 Comprehensive urbanization index

4 讨论

4.1 生态系统服务供需不匹配特征分析

土地利用类型变化和社会经济发展是造成大湾区生态系统服务供需不匹配的主要因素^[12, 39]。生态系统

服务盈余区集中在外围地区,而赤字区集中在中部地区。大湾区外围以山地和林地为主,是重要的生态屏障,生态状况较好,生境斑块完整度较高,可为大湾区提供较高的生态系统服务。然而,由于该区域地形复杂、交通阻力大、经济发展缓慢和人口吸引力弱等原因,生态系统服务需求较低,导致该区域生态系统服务呈现供大于求的特征^[18, 26]。大湾区中部地区,尤其是中心城区,对生态系统服务需求极高,主要是由于这些地区是生活、建筑和工业生产的理想场所,也是大湾区经济和人口增长的主要支柱^[17, 40]。然而,城市化发展通常伴随着土地利用类型变化和生态环境破坏等,进而造成生态系统服务供给能力的降低。土地城市化使大量具有高生态价值的自然生态系统转化为城镇生态系统^[10];而人口城市化快速发展,不仅使城市内部配套基础设施面积快速增长,还使一些原有自然生态系统疏于管理,出现废弃和污染的情况^[41]。

4.2 生态系统服务供需多尺度响应影响因素分析

生态系统服务供需多尺度响应特征受多种因素的共同影响^[42]。不同空间尺度中,自然因素和社会因素组合类型和空间分布格局是导致生态系统供需响应空间差异性的重要原因^[43]。随着空间尺度增大,空间单元内不同土地利用类型、地形、坡度等自然和社会经济因素进行了重组和再配置^[6, 24]。大湾区生态系统服务 HL 型逐渐向中心城区延伸, LH 型向外围地区聚拢,主要是由于土地利用类型和城市化水平的组成与配置格局发生了较大的变化。越靠近中心城区,高度城市化面积占比随空间尺度的增大而增大,而自然生态系统面积占比随空间尺度的增大而减小;越靠近外围地区则正好相反。这也是多尺度生态系统服务供需响应强度变化的主要原因。但当空间尺度过大,城市化发展水平和生态系统服务供需的评估结果平均化较为严重,中和了部分城市化与生态系统服务供需发展不平衡的区域,进而导致该尺度上生态系统服务供需空间响应不显著性增加和响应强度的降低。

空间单元数量也是造成生态系统供需响应差异性的重要原因之一^[6]。在 1 km 空间尺度中,生态系统服务供需响应在空间上的差异性最明显,具有显著聚集特征的网格数量较多,城市化与生态系统服务供需比相互作用关系的空间信息最为丰富。而随着空间尺度的增大,二者空间差异性逐渐减弱,在市域尺度上几乎不存在显著性,这可能与样本的数量有关。1 km、2.5 km、5 km 和 10 km 网格中,样本数量分别为 58074、9723、2617、720 个,区县尺度和市域尺度的样本量分别为 49 个和 11 个。因此,从网格尺度到市域尺度变化过程中,城市化与生态系统服务供需的空间差异性呈现较大的下降趋势。

4.3 生态系统服务供需匹配空间优化策略

优化生态系统服务供需空间匹配应精准调控城市和生态系统空间布局,选择合适的空间尺度进行规划管理^[44]。尺度太小,不利于政府和相关部门规划管理^[13]。尺度太大,容易忽视关键生态系统服务供需不匹配信息^[38]。基于不同种类生态系统服务的特点、量化方式以及其对城市化的响应,结合研究区的实际概况,考虑到数据量的大小,本研究认为高度城市化地区生态系统系统供需匹配优化调控在 10 km 网格尺度和区县尺度为最佳。生态系统服务供需在 10 km 网格尺度和区县尺度与城市化的作用强度最大, HL 型涵盖了较大范围的高度城市化区域, LH 型形成了一定规模的生态系统服务供给源,可为 HL 型分布区提供较高的生态系统服务。因此,可在这两种尺度上通过调控 LH 型分布区和 HL 型分布区的生态系统服务供需匹配度,能够最大程度实现大湾区生态系统服务供需平衡。在区县尺度上,高度城市化地区通过加强区县合作,引入外部生态系统服务,使自身内部生态系统服务供需达到平衡。

4.4 局限与展望

在空间尺度设置方面,本研究采用了网格尺度和行政尺度 2 种类型空间尺度,但在街区尺度、流域尺度等尺度上生态系统服务供需关系及其对城市化的响应还是未知的,需要进一步探讨。本研究尺度效应分析建立在同一套数据源基础上,利用渔网分析工具将研究区分割成不同大小的网格,但忽视了城市绿带、城市公园、口袋公园等不规则分布景观类型的影响。未来还需要进一步完善空间尺度梯度构建。此外,综合卫星遥感、无人机遥感和地面监测数据等多元数据提高各类空间尺度生态系统服务评估精度,为生态系统服务供需平衡精准调控提供数据支撑。

5 结论

本研究基于生态系统服务供需不平衡视角从 1 km×1 km、2.5 km×2.5 km、5 km×5 km、10 km×10 km、区县和市域等 6 个空间尺度揭示了 2020 年粤港澳大湾区生态系统服务对城市化的多尺度响应效应。研究结果表明:

(1) 生态系统服务供需关系空间错配明显, 呈现外围盈余和中心赤字空间特征。随着空间尺度增大, 中心城区生态系统服务供需错配越突出。供需冷点主要集中在珠江三角洲地区, 并逐渐收缩向中心城区聚集; 供需热点逐步向外围和部分沿海地区聚拢。

(2) 城市化与生态系统服务供需之间的主要关系类型为 HL 型、LH 型和 LL 型。随尺度增加, HL 型向中心城区延伸; LH 型向外围地区聚拢, 为大湾区提供一定规模的生态系统服务供给源; LL 型逐渐向 HL 型靠拢。少量的 HH 型向沿海地区靠拢。

(3) 生态系统服务供需响应强度呈现不同的尺度效应, 生境质量服务供需和土壤保持服务供需在 10 km 网格尺度响应最为剧烈; 固碳服务供需在区县尺度响应最为剧烈。

参考文献 (References):

- [1] Peng J, Wang X Y, Liu Y X, Zhao Y, Xu Z H, Zhao M Y, Qiu S J, Wu J S. Urbanization impact on the supply-demand budget of ecosystem services; Decoupling analysis. *Ecosystem Services*, 2020, 44: 101139.
- [2] Deng C X, Liu J Y, Liu Y J, Li 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.
- [3] Ren Q R, Liu D D, Liu Y F. Spatio-temporal variation of ecosystem services and the response to urbanization; evidence based on Shandong Province of China. *Ecological Indicators*, 2023, 151: 110333.
- [4] 梁晨, 曾坚, 沈中健, 王倩雯. 快速城市化生态系统服务格局分析与空间管控——以厦门市为例. *生态学报*, 2021, 41(11): 4379-4392.
- [5] 冯运双, 石龙宇. 雄安新区生态系统服务需求空间分布格局预测. *生态学报*, 2020, 40(20): 7187-7196.
- [6] 韩晓佳, 王继军, 温昕. 退耕区域生态系统服务作用关系尺度效应及分异机制——以安塞区为例. *生态学报*, 2024, 44(5): 1791-1807.
- [7] Wang S, Hu M M, Wang Y F, Xia B C. Dynamics of ecosystem services in response to urbanization across temporal and spatial scales in a mega metropolitan area. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 77: 103561.
- [8] 陈万旭, 刘志玲, 李江凤, 冉端, 曾杰. 长江中游城市群生态系统服务和城镇化之间的空间关系研究. *生态学报*, 2020, 40(15): 5137-5150.
- [9] Yang Y N, Li J, Wang L, Wang Z H, Yao C X, Wang Y. Impact of urbanization on supply and demand of typical ecosystem services in Yangtze River Delta. *Journal of natural resources*, 2022, 37(6): 1555.
- [10] 凌云, 杨宜男, 许迦龙, 王立, 王子豪, 孙艺妍, 姚晨心, 王原. 京津冀地区城市化对典型生态系统服务供需关系的影响. *生态学报*, 2023, 43(13): 5289-5304.
- [11] Pan Z Z, Wang J W. Spatially heterogeneity response of ecosystem services supply and demand to urbanization in China. *Ecological Engineering*, 2021, 169: 106303.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Larondelle N, Lauf S. Balancing demand and supply of multiple urban ecosystem services on different spatial scales. *Ecosystem Services*, 2016, 22: 18-31.
- [15] Zhao X Q, Xu Y F, Pu J W, Tao J Y, Chen Y J, Huang P, Shi X Y, Ran Y J, Gu Z X. Achieving the supply-demand balance of ecosystem services through zoning regulation based on land use thresholds. *Land Use Policy*, 2024, 139: 107056.
- [16] 方创琳, 王洋. 粤港澳大湾区建设世界级超大城市群的特殊性与行动路径. *城市与环境研究*, 2022, 9(1): 55-67.
- [17] Feng R D, Wang F Y, Wang K Y. Spatial-temporal patterns and influencing factors of ecological land degradation-restoration in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. *Science of the Total Environment*, 2021, 794: 148671.
- [18] Feng R D, Wang F Y, Wang K Y, Xu S J. Quantifying influences of anthropogenic-natural factors on ecological land evolution in mega-urban agglomeration; a case study of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay area. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 283: 125304.

- [19] 王朝阳, 张军以, 李海懿, 苏维词. 重庆市土地利用冲突多尺度时空演化与多情景演化模拟. 生态学报, 2024, 44(3): 1024-1039.
- [20] 傅伯杰, 周国逸, 白永飞, 宋长春, 刘纪远, 张惠远, 吕一河, 郑华, 谢高地. 中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全. 地球科学进展, 2009, 24(6): 571-576.
- [21] 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.
- [22] Zhou L L, Zhang H Z, Bi G H, Su K C, Wang L, Chen H J, Yang Q Y. Multiscale perspective research on the evolution characteristics of the ecosystem services supply-demand relationship in the Chongqing section of the Three Gorges Reservoir area. *Ecological Indicators*, 2022, 142: 109227.
- [23] Yang M H, Gao X D, Zhao X N, Wu P T. Scale effect and spatially explicit drivers of interactions between ecosystem services—a case study from the Loess Plateau. *Science of the Total Environment*, 2021, 785: 147389.
- [24] 张弛, 李枝坚, 曾辉. 基于小波变换的生态系统服务权衡尺度效应与影响因素研究——以珠江三角洲为例. 地理研究, 2022, 41(5): 1279-1297.
- [25] Zhang Z, Jiang W G, Peng K F, Wu Z F, Ling Z Y, Li Z. Assessment of the impact of wetland changes on carbon storage in coastal urban agglomerations from 1990 to 2035 in support of SDG15.1. *The Science of the Total Environment*, 2023, 877: 162824.
- [26] 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.
- [27] Jia K, Huang A L, Yin X L, Yang J, Deng L M, Lin Z L. Investigating the impact of urbanization on water ecosystem services in the Dongjiang river basin: a spatial analysis. *Remote Sensing*, 2023, 15(9): 2265.
- [28] 熊茂秋, 刘晓煌, 张雪辉, 刘玖芬, 郑艺文, 张子凡, 赖明, 付宇佳. 基于RUSLE模型的塔里木河流域上游土壤保持时空变化研究. 地质通报, 2024, 43(4): 641-650.
- [29] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 黄丽, 张光远. 应用USLE模型与地理信息系统IDRISI预测小流域土壤侵蚀量的研究. 水土保持学报, 2000, 14(2): 19-24.
- [30] 张肖, 向晓东, 刘汉杰, 吴高明. 钢铁行业碳排放量核算方法的实证性研究. 工业安全与环保, 2012, 38(6): 86-88.
- [31] Li K, Hou Y, Andersen P S, Xin R H, Rong Y J, Skov-Petersen H. An ecological perspective for understanding regional integration based on ecosystem service budgets, bundles, and flows: A case study of the Jinan metropolitan area in China. *Journal of Environmental Management*, 2022, 305: 114371.
- [32] Chen D S, Li J, Yang X N, Zhou Z X, Pan Y Q, Li M C. Quantifying water provision service supply, demand and spatial flow for land use optimization: a case study in the YanHe watershed. *Ecosystem Services*, 2020, 43: 101117.
- [33] Li T J, Wang H M, Fang Z, Liu G, Zhang F, Zhang H T, Li X X. Integrating river health into the supply and demand management framework for river basin ecosystem services. *Sustainable Production and Consumption*, 2022, 33: 189-202.
- [34] 白杨, 王敏, 李晖, 黄沈发, Alatalo J M. 生态系统服务供给与需求的理论与管理方法. 生态学报, 2017, 37(17): 5846-5852.
- [35] 张蓬涛, 刘双嘉, 周智, 刘春敬, 徐磊, 高星. 京津冀地区生态系统服务供需测度及时空演变. 生态学报, 2021, 41(9): 2254-3367.
- [36] Yan S W, Chen H, Quan Q, Liu J. Evolution and coupled matching of ecosystem service supply and demand at different spatial scales in the Shandong Peninsula urban agglomeration, China. *Ecological Indicators*, 2023, 155: 111052.
- [37] 王莉雁, 肖焱, 江凌, 饶恩明, 欧阳志云, 郑华. 城镇化发展对呼包鄂地区生态系统服务功能的影响. 生态学报, 2016, 36(19): 6031-6039.
- [38] 邓钰栋, 王丹, 许涵. 双尺度下广东韶关市生态系统服务及其权衡/协同关系及社会生态驱动因素. 应用生态学报, 2023, 34(11): 3073-3084.
- [39] Bryan B A, Ye Y Q, Zhang J E, Connor J D. Land-use change impacts on ecosystem services value: incorporating the scarcity effects of supply and demand dynamics. *Ecosystem Services*, 2018, 32: 144-157.
- [40] Wen Y Y, Yang J, Liao W L, Xiao J N, Yan S H. Refined assessment of space-time changes, influencing factors and socio-economic impacts of the terrestrial ecosystem quality: a case study of the GBA. *Journal of Environmental Management*, 2023, 345: 118869.
- [41] Cai W B, Jiang W, Du H Y, Chen R S, Cai Y L. Assessing ecosystem services supply-demand (mis) matches for differential city management in the Yangtze River Delta urban agglomeration. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(15): 8130.
- [42] Zhang F, Xu N, Wang C, Guo M J, Kumar P. Multi-scale coupling analysis of urbanization and ecosystem services supply-demand budget in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China. *Journal of Geographical Sciences*, 2023, 33(2): 340-356.
- [43] Felipe-Lucia M, Comín F. Ecosystem services-biodiversity relationships depend on land use type in floodplain agroecosystems. *Land Use Policy*, 2015, 46: 201-210.
- [44] 刘一鸣, 徐媛银, 曾辉. 中国东海海岸带地区生态系统健康评估及其尺度依赖性. 生态学报, 2022, 42(24): 9913-9926.