

DOI: 10.20103/j.stxb.202505151187

庄宝怡, 孙传淳, 植接弟, 李景刚. 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. 生态学报, 2025, 45(24): 12453-12469.

Zhuang B Y, Sun C Z, Zhi J D, Li J G. Regional ecological network construction for ecological well-being: a case study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(24): 12453-12469.

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

庄宝怡¹, 孙传淳^{1,2,*}, 植接弟¹, 李景刚^{1,2}

¹ 华南农业大学公共管理学院, 广州 510642

² 华南农业大学自然资源部华南热带亚热带自然资源监测重点实验室, 广州 510700

摘要:提升生态福祉水平是实现区域可持续发展和改善生活质量的重要举措。以生态系统服务供需流动机制为指导,提出满足大都市区域生态系统服务需求特征的生态福祉提升网络具有重要的科学意义。然而现有研究总体上缺乏对生态系统服务供需间作用机制的科学认知,也缺乏对人类如何获取生态系统服务的可达性机制考量,导致所构建的区域生态网络难以有效应用于生态福祉提升实践。同时,现有研究还普遍存在综合化表征生态系统服务供给和需求的特征,造成供需的差异化表征不足。因此,如何基于生态系统服务供需流动机制构建精准和差异化的区域生态福祉提升网络?是本文拟解决的关键科学问题。基于此,本研究首先在刻画生态系统服务供需流动特征和机制的基础上,建立居民福祉提升的生态网络形成机制认知框架。而后顾及大都市区生态系统服务高阶需求特征,以粤港澳大湾区为例,选取典型生态系统服务类型,结合细粒度空间数据,精细刻画不同生态系统服务需求空间分布特征。研究在传统生态安全网络的基础上,通过识别差异化的生态系统服务需求满足廊道,构建区域生态福祉提升网络。研究结果表明:粤港澳大湾区的生态系统服务供给与需求分别呈现出“四周高、中部低”及“中部高、四周低”的空间错配现象;基于上述认知框架,本研究形成了粤港澳大湾区生态系统服务供给源地和需求源地分别为 23201.75km² 和 23651.13km²,分别占区域总面积的 41.82% 和 42.63%。另形成基础生态安全网络和各类居民福祉提升生态网络分别为 3045.87km 和 3193.16km,形成生态夹点 107 处,并在此基础上形成“一圈一带五廊道”的居民福祉提升生态网络宏观优化方案及提出针对性保护修复对策。研究可为丰富生态福祉与生态安全理论提供支撑,并为推动国土空间生态网络优化提供参考。

关键词:生态福祉;生态网络;生态系统服务;供需流动机制;都市区域

Regional ecological network construction for ecological well-being: a case study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

ZHUANG Baoyi¹, SUN Chuanzhun^{1,2,*}, ZHI Jiedi¹, LI Jinggang^{1,2}

¹ School of Public Management, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

² Key Laboratory of Natural Resources Monitoring in Tropical and Subtropical Area of South China, Ministry of Natural Resources, South China Agricultural University, Guangzhou 510700, China

Abstract: Enhancing ecological well-being was crucial for regional sustainable development and quality of life improvement. Guided by the flow mechanism of ecosystem service supply-demand, this study proposed an ecological well-being improvement network tailored to the characteristics of ecosystem service demand in metropolitan areas. However, existing studies generally lacked a scientific understanding of the interaction mechanisms between ecosystem services supply and

基金项目: 国家社会科学基金(20CGL063)

收稿日期: 2025-05-15; 采用日期: 2025-08-31

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: suncz@scau.edu.cn

demand, as well as insufficient consideration of the accessibility mechanisms through which humans obtain ecosystem services. This had resulted in regional ecological networks that were difficult to effectively apply in practices aimed at enhancing ecological well-being. Moreover, current research often failed to comprehensively characterize the supply and demand of ecosystem services, leading to inadequate differentiated representation of their disparities. Thus, the key scientific question addressed in this paper is: How can a precise and differentiated regional ecological well-being enhancement network be constructed based on the flow mechanism of ecosystem services supply and demand? To address this, this study first established a cognitive framework for the formation mechanism of ecological networks aimed at enhancing residents' well-being, based on characterizing the features and mechanisms of ecosystem services supply and demand flow. Then, focusing on the high-level demand characteristics of ecosystem services in metropolitan areas and taking the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area as an example, typical types of ecosystem services were selected. Using fine-grained spatial data, the spatial distribution characteristics of different ecosystem services demands were meticulously delineated. Furthermore, building upon traditional ecological security networks, this study identified differentiated corridors for fulfilling ecosystem services demands to construct a regional ecological well-being enhancement network. The results showed that the supply and demand of ecosystem services in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area exhibit a spatial mismatch pattern, with "high supply in the periphery and low supply in the center" versus "high demand in the center and low demand in the periphery". Based on the aforementioned cognitive framework, the study identified 23201.75km² (41.82% of the total area) as ecosystem service supply sources and 23651.13km² (42.63%) as demand areas in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. Furthermore, the constructed networks included 3,045.87km of basic ecological security corridors and 3,193.16km of well-being enhancement linkages, with 107 ecological pinch points detected. Building upon this framework, a macro-optimization strategy for the ecological well-being enhancement network was proposed, characterized by a spatial configuration of "one circle, one belt, and five corridors". This research advanced the theoretical integration of ecological security and human well-being paradigms, offering operational guidance for territorial spatial planning optimization.

Key Words: ecological well-being; ecological network; ecosystem services; supply-demand flow mechanism; metropolitan area

居民福祉提升是当前全球可持续发展议程中的核心议题。联合国《2030 年可持续发展议程》的 17 个可持续发展目标(Sustainable Development Goals, SDGs)皆是为了提升人类福祉、改善居民生活质量^[1-2]。其中目标 11 为建设包容、安全、有抵御灾害能力和可持续的城市和人类居住区,其包含了通过保护和建设自然基础设施,以支撑城市和区域可持续发展的重点措施^[3]。然而,近期评估显示目前有半数 SDGs 目标进展停滞甚至倒退^[4-5]。为加快中国实现 SDGs,科学家们已提出诸如美丽中国生态建设、民生福祉提升等许多应对措施^[5-6]。增进居民福祉也被中共二十大列为重大发展目标。大都市区通常以较小的土地面积承载着高密度人口和发达的经济体量,因而存在着巨量而高阶的生态系统服务需求。因此,构建适合大都市区满足居民需求的细粒度精细化的生态福祉提升网络,是实现区域高质量可持续发展的关键。

生态系统提供的福祉(简称生态福祉),是指人类从生态系统服务中获取的收益以满足自身需求。生态福祉大小取决于居民生态系统服务需求的满足程度^[7-8]。当前顾及生态系统服务需求的生态网络建设研究主要从两个层面开展:

首先,一些研究以生态系统服务供需比为源地的重要性识别依据^[9]。学者们通常以生态系统服务重要性且供需耦合条件(以供需比测度)较好的空间范围作为生态源地^[10-11],以此作为构建区域生态安全网络的起始点。该类研究在刻画生态系统服务原位需求和全向需求上具有优势。但正由于其对供给和需求区域进行了耦合,无法建立二者之间的流动联系和有效反映定位需求,因此难以刻画生态系统服务供给与需求之间

的有效路径。同时,相关研究在构建网络的过程中,不同类型的生态源地之间使用相同的阻力面,导致构建的生态网络难以区分人类和其他生物流动特征,本质上仍然是非人类的生物流动主导网络,不利于应用到提升人类福祉。

其次,鉴于上述研究的在流动趋势刻画上的缺陷,一些研究开始考虑生态系统服务从供给向需求的流动特征,并结合“供给-流动-需求”研究框架,建立生态系统服务高供给区域和高需求区域的连通廊道,从而形成兼顾生态保护和福祉提升的生态网络^[12-13]。相关研究涵盖了生态系统服务供给网络和供需网络两类。两类生态网络的构建均遵循“源地-阻力面-廊道”的研究范式^[14-16]。与上一类研究类似,这类研究也大都以相同的阻力面作为两类生态网络构建的依据^[15,17],总体上缺乏对生态系统服务供需间作用机制研究的认知^[18],也缺乏对人类如何获取生态系统服务的可达性机制考量。

少数学者尝试通过明晰生态系统服务供需作用机制,并进一步通过增设生态供需廊道与节点构建福祉提升生态网络^[18]。但相关研究将生态系统服务流简单假设为综合供给和与综合需求全向流动,尚缺乏生态系统服务类型和需求的差异化考量,依然难以较好地反映生态系统服务供需定向流动机制。总体而言,现有生态网络构建相关研究在准确刻画生态系统服务供需流动特征和机制方面尚不完善,难以有效应用于生态福祉提升实践。

此外,现有研究普遍存在综合化表征生态系统服务供给和需求的特征,造成供需的差异化表征不足。尤其对于生态系统服务需求的刻画,现有研究一般采用人口密度、GDP、土地利用强度等综合性较强的指标进行间接反映^[10,19-21]。一方面使得空间表征精度较低,且存在大量行政单元统计数据简单转变为空间数据的现象,总体刻画粗糙。另一方面,综合刻画方法也使得生态系统服务受益对象不明确,难以区分不同类型生态系统服务需求及其空间位置。第三,基于马斯洛需求层次理论,经济发达地区的生态系统服务需求具有更高阶倾向特征^[22],当前研究亦未对此进行差异化表征。

综上,如何基于生态系统服务供需流动机制构建精准和差异化的区域生态福祉提升网络?是本文拟解决的关键科学问题。本研究首先在刻画生态系统服务供需流动特征和机制的基础上,建立居民福祉提升的生态网络形成机制认知框架。而后顾及大都市区生态系统服务高阶需求特征,以粤港澳大湾区为例,选取典型生态系统服务类型,结合细粒度空间数据,精细刻画不同生态系统服务需求空间分布特征。研究最后在传统生态安全网络的基础上,通过识别差异化的生态系统服务需求满足廊道,构建区域生态福祉提升网络。

1 居民福祉提升的生态网络构建逻辑

1.1 居民福祉提升的生态网络形成机制认知

生态福祉是居民从生态系统服务中获取的收益以满足自身需求,是居民对生态系统服务实际消费、使用或占用那部分^[23]。根据这一定义,首先生态系统服务供给是福祉产生的基础,良好的生态系统服务供给维持物质转移、能量流动与种间交流,构成基础生态安全网络(图1)。其次,基于生态系统服务流理论,居民获取到生态系统服务并实现生态福祉包含两种机制。一是生态系统服务扩散效应与居民需求差异产生顺势差,自动形成从生态系统服务供给到需求的流^[24-25]。另一方面,在需求的驱动下居民通过空间移动主动消费、使用或占用生态系统服务,获得和增进自身福祉^[14,17]。这一逆向获取路径可以看作是生态系统服务逆势差流动。顺势与逆势差取决于不同生态系统服务类型供需特征差异。两种势差均需克服空间阻力形成相应的路径,阻力类型也因生态系统服务类型而异。基于上述机制,本文将顺势差定义为:生态系统服务供给区通过空气、水体等介质的流动或生物的自由移动实现自然扩散过程并产生梯度效应,生态系统服务需求区在效应范围内自动获取到生态系统服务,流量和路径取决于介质类型和物质扩散方式。将逆势差定义为:由于空间范围内一些生态系统服务供需错配,居民为了满足自身生态系统服务需求而克服一定的阻力进入生态系统服务供给区享受生态福祉所形成的特定路径。

1.2 都市区域居民生态福祉提升网络实现目标

都市区域内部生态系统调节服务与文化服务与居民联系更为紧密和直接,对提高都市区域居民福祉有着

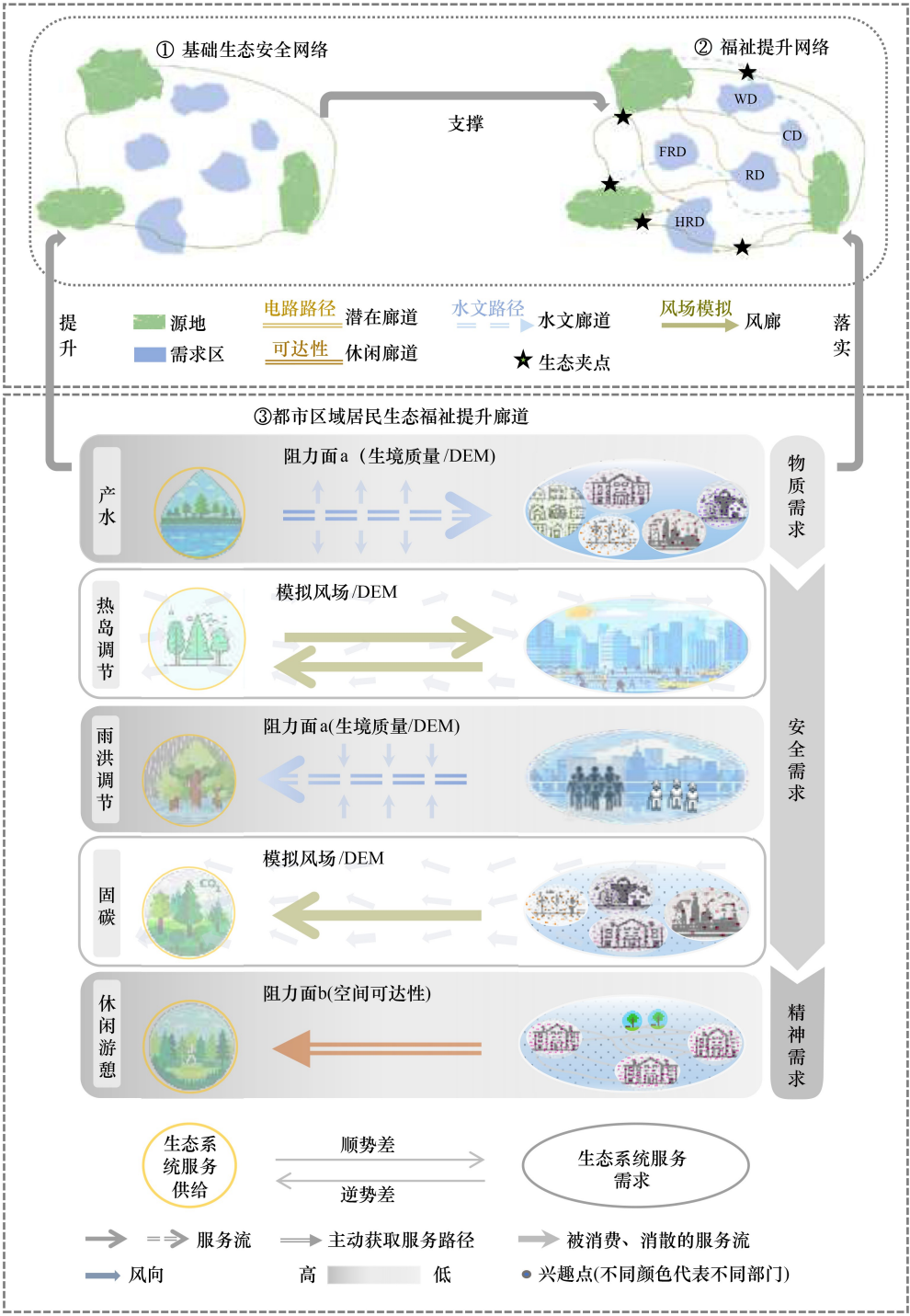


图 1 面向都市区域居民福祉提升目标的生态网络构建逻辑示意图

Fig.1 The logic of ecological network construction for the goal of improving the well-being of urban residents

WD:产水服务需求区;CD:固碳服务需求区;FRD:雨洪调节服务需求区;RD:休闲游憩服务需求区;HRD:热岛调节服务需求区

至关重要的作用^[22]。联系马斯洛需求层次理论,都市区域居民对城市生态系统服务的需求更侧重于安全需求和精神需求。结合前文机制认知,都市区域居民生态福祉提升网络实现目标为:在传统基础安全网络的基础上,满足高阶生态系统服务需求,精确识别各类生态系统服务供需区域,建立顺/逆势差供需差异化路径。基于这一目标,本研究识别了基础生态安全网络和居民福祉提升生态网络(图 1)。前者皆在维持区域基本生

态安全,保障区域生物多样性,提升生态系统服务供给水平,适应人类活动和气候变化的双重胁迫,前者对后者起到基础支撑作用。后者在前者的基础上强化居民对区域自然生态的连接,提升居民对生态系统服务实际消费、使用或占用水平。第三,顾及都市区域较高人口、经济和文化密度,以及其生态系统服务供需错配特征,本研究建立了区域差异化顺/逆势差生态系统服务供需廊道,以增强基础生态安全网络的韧性,同时落实生态福祉提升网络。

对于具体生态系统服务类型的选择,则进一步根据研究区社会特点与生态本底特征来决定。主要考虑两方面:一是区域人口规模大,空间分布密集,经济发展程度较高,易受高温和内涝等风险的影响,且对水资源需求较大;二是区域植物群落景观质量整体良好,景观质量所带来的良好休憩条件是该区域的重要优势。基于此,本项目拟选择城市热岛调节服务、雨洪调节服务、产水服务、固碳服务、日常休闲游憩服务等5项与城市生态安全和居民身心健康密切相关的生态系统服务类型分别进行供需评估。

2 研究区方法与数据来源

2.1 研究区域概况

粤港澳大湾区(Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, GBA)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、肇庆九个珠三角城市组成,总面积为5.6万 km^2 (图2)。粤港澳大湾区属亚热带季风气候,年均温约为 22.5°C ,年降水量约为1600—2000mm,高温天数长、雨季多、水系发达。据2022年欧洲航天局土地覆被类型数据显示,大湾区林地广布,植被覆盖率达60%,且多分布于肇庆市、惠州市、广州市北部等外围区域,形成天然屏障。建设用地占比约为12%,多被外围生态地环绕,呈现出内嵌于大湾区中部的分布态势。作为我国开放程度最高、经济活力最强的区域之一,2022年粤港澳大湾区GDP总量达13万亿元,常住人口达8640.24万人,城镇化率约为87.48%。多年来,大湾区以不到全国0.6%的土地承载全国约5%的人口,创造12%的国内生产总值(GDP)^[26]。

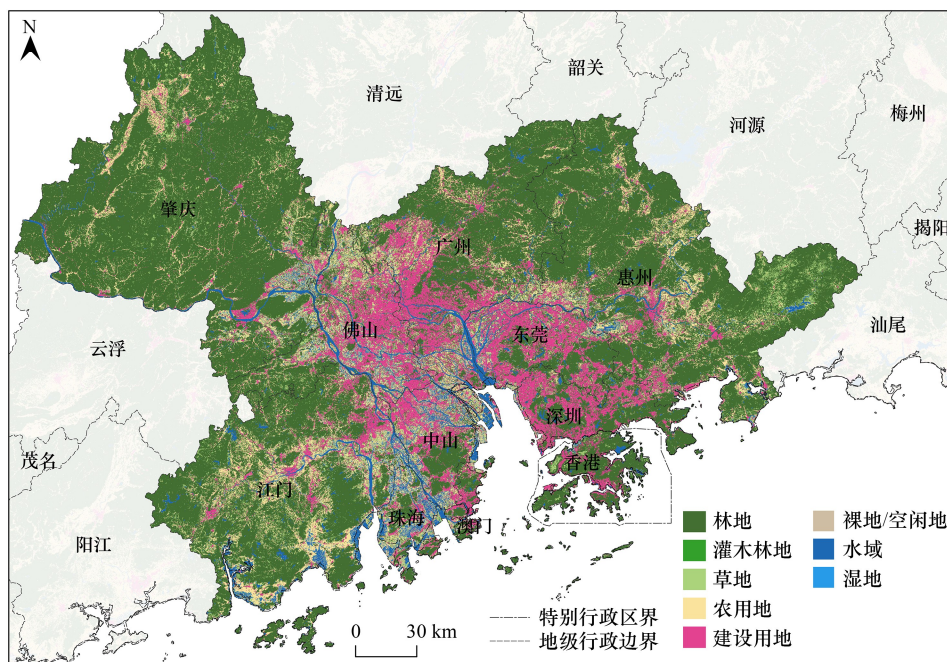


图2 研究区

Fig.2 Study area

2.2 数据来源与处理

本研究使用的数据主要用于生态系统服务供给和需求评估,主要包括土地利用/覆被数据、土壤水文组数

据、降水量数据、各行业及住宅 POI(Points of Interest)数据、人口密度数据、路网数据、人口数量数据、用水量数据、标准煤消耗量数据、夜间灯光指数等(表 1)。由于本研究对生态系统服务需求的表征精度精确到 100m 空间分辨率,因此也将所有原始空间数据通过重采样等方式统一到 100m 空间分辨率。

表 1 数据来源

Table 1 Data source

类型 Type	数据 Data	原始精度 Original resolution	数据来源 Data source
生态系统服务供给评估所需数据 Data required for assessing ecosystem service supply	年降水量及潜在蒸散发量数据	1000m	国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/) 2021 年降水数据。
	净初级第一性生产力	500m	美国地质勘探局(https://www.usgs.gov/)。
	暴雨深度等气象数据		粤港澳大湾区 2022 年气候监测公报(https://www.hko.gov.hk/sc/cis/GBAClimat.htm)。
	土地利用/覆被数据	10m	欧洲航天局(https://esa-worldcover.org/en), 年份为 2021 年。
生态系统服务需求评估所需数据 Data required for assessing ecosystem service demand	土壤水文组数据	250m	NASA-USDA, 2022 年的土壤数据(https://developers.google.cn/earth-engine/datasets/catalog/NASA_USDA_HSL_SMAP10KM_soil_moisture)
	各行业 POI 数据		高德地图 23 大类数据, 年份为 2021 年。
	各部门用水量数据	区/县级	广州、深圳、珠海、佛山、惠州、东莞、中山、江门、肇庆的数据来源于各市 2021 年水资源公报; 香港数据来源于香港特别行政区水务署(https://www.wsd.gov.hk/sc/publications-and-statistics/pr-publications/the-facts/); 澳门数据来源于澳门特别行政区海事及水务局(https://www.marine.gov.mo/mobile/news_detail.aspx_a_id=1647835212)。
	常住人口数据、老年人口比重、地均 GDP	区/县级	广州、深圳、珠海、佛山、惠州、东莞、中山、江门、肇庆的常住人口数据来源于各市 2023 年统计年鉴; 香港数据来源于香港特别行政区政府统计处(https://www.censtatd.gov.hk/sc/), 年份为 2022; 澳门数据来源于澳门特别行政区政府统计暨普查局(https://www.dsec.gov.mo/zh-MO/), 年份为 2022 年。
	路网数据	省级	OpenStreetMap(https://www.openstreetmap.org/), 广东省路网数据, 年份为 2021 年。
	各部门标准煤消耗量数据	市级	来源于各市 2022 年统计年鉴数据。
	夜间灯光数据	500m	美国国家环境信息中心(https://eogdata.mines.edu/products/vnl/) 2021 年夜间灯光数据。
	累积多年风速/风向数据		国家气象科学数据中心(https://data.cma.cn/data/detail/dataCode/A.0053.0002.S011.html), 1991—2020 年风年值数据。

POI:兴趣点 Point of interest;GDP:国内生产总值 Gross domestic product

2.3 研究方法

本文选择生态系统服务综合供给盈余(供大于需)和综合供给热点区域的交集作为生态源地。同时取各项生态服务供给赤字且需求热点区域作的交集为各项生态系统服务的重要需求区。福祉提升生态网络则由源地之间以及供需之间两类网络构成。相关计算方法如下:

2.3.1 生态系统服务供给量化

本文采用空间评估模型和已有文献的相关算法评估生态系统服务供给。其中产水、热岛调节和雨洪调节服务的生态供给量分别利用 InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs)模型中的 Annual water yield 模块^[27]、Urban cooling 模块^[28]和 Urban flood risk mitigation 模块^[29]进行量化;固碳服务则是借鉴光合作用方程^[30],以光合作用所产生的干物质中的碳含量对其供给量进行量化;休闲游憩服务则基于绿地服务

半径^[31]对其供给量进行量化,休闲游憩服务供给计算公式如下:

$$S_{lr_i} = \begin{cases} \frac{1}{n} \sum Area_i & d \leq d_{\max} \\ 0 & d > d_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中, S_{lr_i} 为像元*i*上的休闲游憩服务供给量; $Area_i$ 为像元*i*的城市绿地面积; d 为像元*i*之间的距离; d_{\max} 为城市绿地最大服务半径(2230m),是采用大湾区的广州市居民步行偏好问卷调查数据,经由时间偏好转换为距离得出的^[32]; n 为城市绿地最大服务半径内的像元个数。

ESs 综合供给由各项生态系统服务数据归一化后叠加分析所得。

2.3.2 生态系统服务需求量化

(1) 产水服务

产水服务需求主要体现为各部门用水需求,总需求量主要由第一、第二、第三产业用水量、生活用水量及公共服务用水量构成。为提高需求识别精度,本研究将各行业的 POI 点按上述五个方面进行归并,并将以上部门用水量在其相应的 POI 核密度图层上进行空间分配。

$$D_{wy} = W_1 + W_2 + W_3 + W_{up} + W_l \quad (2)$$

式中, D_{wy} 表示水源服务的总需求; W_1 、 W_2 、 W_3 分别表示第一、二、三产业的用水需求; W_{up} 表示城市公共服务用地的用水需求; W_l 表示生活用水需求。

(2) 热岛调节服务

本研究采用人口的高温暴露程度反映热岛调节需求。热岛效应多受人为因素、自然因素等多因子交互作用影响^[33]。在城市发展程度越高、人口越密集的区域,其热暴露风险更高,对热岛调节的需求也更为迫切^[34]。因此,热岛需求的测算采用城市热岛区域地表温度与社会经济的多元关系模型,该模型以单元人口密度、路网密度、建设用地占比、植被占比及水体占比对地表温度进行拟合,并利用夜间灯光指数进行修正^[35]。

$$D_{hr} = T \times L \quad (3)$$

$$T = 24.98 + 0.7872 \ln P_d + 0.065 d_r + 0.679 R_c - 0.482 R_v - 0.443 R_w \quad (4)$$

式中, D_{hr} 表示热岛调节服务需求总量; T 表示地表温度; L 表示归一化后的夜间灯光数据; P_d 表示单元分区人口密度; d_r 表示单元路网密度; R_c 表示建设用地面积占比; R_v 表示植被面积占比; R_w 表示水体面积占比。

(3) 雨洪调节服务

本研究采用人口雨洪暴露风险程度反映雨洪调节需求。本文借鉴了 H-E-V (Hazard-Exposure-Vulnerability) 框架,该框架基于危险性、暴露性及脆弱性对城市雨洪风险进行评估^[36]。风险越高的区域,其需求越大,其具体公式如下:

$$D_{fr} = V_{Ri} \times P_d \times N \quad (5)$$

式中, D_{fr} 表示雨洪调节服务需求总量; V_{Ri} 为暴雨滞留量,利用 InVEST 模型获取,用以表征危险性; P_d 为分区单元人口密度,表征暴露性; N 表征脆弱性,综合老年人口比重、地均 GDP、建筑密度进行评估所得^[37]。

(4) 固碳服务

固碳服务的需求量以各部门的碳排放量表征。以各部门标准煤消耗量(万 t)乘以排放因子,测算各部门碳排放量,并在其相应的 POI 核密度图层上进行空间分配。

$$D_{car} = C_1 + C_2 + C_3 + C_{lc} \quad (6)$$

式中, D_{car} 表示固碳服务的需求总量; C_1 、 C_2 、 C_3 表示第一、二、三产业的碳排放量; C_{lc} 表示生活消费的碳排放量。

(5) 休闲游憩服务

居民休闲游憩服务需求是居民对某种生态系统服务的偏好及取向^[38],可表现为能够满足居民日常休闲游憩服务需求的绿地空间。本研究利用住宅区 POI 核密度数据,对各市常住人口按区(县)进行空间分配,并

结合各市绿地规划测算居民休闲游憩服务需求量,具体计算公式如下:

$$D_{it} = R_c \times 17.8 \quad (7)$$

式中, D_{it} 表示休闲游憩服务的需求总量; R_c 为不同核密度下的人口数量; $17.8 \text{ m}^2/\text{人}$ 为人均绿地需求量, 是根据各市规划人均绿地与人口之间的关系所得。具体为各市规划人均绿地面积与各市总人口的积乘, 再除以大湾区总人口。其中香港和澳门因缺乏相关规划, 采用的是现状绿地面积。

2.3.3 供需平衡状态测算(供需比测度)

生态系统服务供需比可以反映特定区域内生态系统的实际供给和人类需求之间的平衡状态^[39], 具体计算公式如下:

$$\text{ESD}_i = \frac{S_i - D_i}{(S_{\max_i} - D_{\max_i}) / 2} \quad (8)$$

式中, ESD_i 表示 i 项服务的供需比; S_i 、 D_i 、 S_{\max_i} 和 D_{\max_i} 分别表示 i 项生态系统服务供给、需求、供给最大值和需求最大值。 $\text{ESD}_i > 0$ 表示生态系统服务的供给大于需求, 即供给有所盈余, 生境质量好; $\text{ESD}_i = 0$ 表示供需平衡, 即供给恰好能够满足当地需求; $\text{ESD}_i < 0$ 则表示当前供给无法满足需求, 供给出现赤字, 对人类福祉产生了不利影响。

(6) 综合供需比测算

综合供需比的量化计算公式如下:

$$\text{CESD} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{ESD}_i \quad (9)$$

式中, CESD 表示综合供需比; n 表示生态系统服务的数量, $n = 5$; ESD_i 表示第 i 项生态系统服务的供需比。

2.3.4 福祉提升生态网络构建

本研究构建源地之间以及供需两类生态网络, 并在网络中生成生态夹点。

(1) 源地间生态网络

生态系统的物质和能量流动的随机性与电子随机游走的特性类似^[21]。因此, 本文基于电路理论, 利用 Linkage Mapper 工具识别源地之间的潜在生态廊道, 提取最小成本路径作为最优路径。

(2) 生态系统服务供需网络

① 水文供需服务构建

水文供需廊道据其流向分为产水服务供需廊道与雨洪调节服务廊道。产水服务供需廊道主要是水源盈余的上游区域向供给赤字的下游需求区输送水资源的通道^[40-41](顺势差, 图 1); 而雨洪调节廊道则主要是由重点需求区向附近生态源地输送城市难以排解的涝水(逆势差)。本研究根据水流特性, 基于 DEM 数据, 利用 GIS 工具进行水文分析, 提取区域径流, 以此作为构建水文供需廊道的依据。本研究以其生态系统服务在供需区域的输送方向区分产水廊道与雨洪调节廊道, 将依地势由源地流向产水服务需求区的水廊作为产水廊道, 由雨洪需求区流向源地及海域的水廊作为雨洪廊道。

② 风廊构建

在固碳服务流模型中, 提供固碳服务的源地会通过大气环流与其使用者建立连接^[42]。风廊有利于将需求区的碳排放输送到源地(逆势差), 还能够连通城市与城市外的生态冷源, 将冷空气引入城市内部, 并促进城市内部空气流动, 缓解城市热岛效应^[42-43](顺势差与逆势差)。因此, 风廊既可以作为固碳服务供需廊道, 也可作为热岛调节服务需求区与源地之间的供需廊道。本研究基于 1991—2020 的累计多年风向数据, 进行风场模拟, 并综合考虑连接供需区域的主要风向, 以构建固碳服务及热岛调节服务的供需风廊。本文将固碳需求区顺主要风向输送碳至源地的路径视为固碳服务供需廊道, 将源地经由水系及低洼带的风向送往热岛需求区的冷流, 以及需求区顺水系及风向输送到源地的路径作为热岛调节服务供需风廊。

③ 休闲廊道构建

在生态供需错配时,人类主动获取优质生态环境会优先趋向于选择空间上较为便利且更易到达的区域^[18],因此可以以空间可达性作为人类移动趋向阻力面,结合最小累积成本距离构建休闲游憩服务供需廊道。本研究采用高斯两步移动搜索法衡量休憩服务供需间的空间可达性。该方法通过探究源地与需求区的规模、质量及供需间的距离测度空间可达性^[44],其计算公式如下:

$$R_j = \frac{S_j}{\sum_{k \in \{d_{kj} \leq d_0\}} G(d_{ij}) D_k} \quad (10)$$

$$Gd_{ij} = \begin{cases} \frac{e^{-\frac{1}{2} \times \frac{d_{ij}^2}{d_0^2}} - e^{-\frac{1}{2}}}{1 - e^{-\frac{1}{2}}} & d_{ij} \leq d_0 \\ 0 & d_{ij} > d_0 \end{cases} \quad (11)$$

$$A_i = \sum Gd_{ij} \times R_j \quad (12)$$

式中, R_j 为供给源地的供需比; S_j 为源地的供给规模; d_{ij} 为需求区 k 到源地 j 的出行距离; d_0 为给定的搜索半径阈值,综合考虑道路等级及源地面积大小差异将其设为 1—3h(县道为 26.63km/h,城市快速路为 80km/h)的出行距离^[45]; $G(d_{ij})$ 为距离衰减的高斯函数; D_k 为搜索半径内的需求区人口规模; A_i 为需求区 i 到源地的可达性水平。

(3) 生态夹点

本研究构建以下两类生态夹点:一是潜在生态廊道上的夹点。本研究采用 Linkage Mapper 软件,基于生态阻力面和生态源地,提取廊道内部的面状生态夹点。为了图形美观,这些面状夹点在最终的网络图上显示的是面的中心点。二是生态廊道与供需廊道相互作用的夹点。本研究提取潜在生态廊道与供需廊道的交点,作为这类生态夹点。

3 结果分析

3.1 生态系统服务供给空间

粤港澳大湾区的生态系统服务供给存在明显的空间异质性(图 3),总体上呈现出中间低四周高的分布格局。大湾区生态系统服务热点区域面积为 23869.28km²,占比超 43.02%,多分布于肇庆市、广州市北部、惠州市东部和江门市西部等周边区域。供给冷点区域面积约为 19014.71km²,其占比约为 34.27%,多分布在大湾区中部区域,供给冷热点比例较为均衡(图 3)。上述空间分布格局的主要原因是大湾区周边区域主要分布着自然生态用地,生境斑块较为完整,且人类活动干扰较少,自然生态系统整体较为完整。而大湾区中心区域人口和产业集聚程度高,城市化发展水平较高,生境斑块较为破碎。不同的生态系统服务的供给水平也存在着明显差异,但其空间分布特征均与总体格局较为一致。

3.2 生态系统服务需求空间

3.2.1 生态系统服务需求空间分布特征

粤港澳大湾区的生态系统服务需求分布均具有明显空间异质性,主要呈现出中部高,四周低的分布格局(图 4),该特征与生态系统服务供给分布特征相反,其主要原因也与生态系统服务供给类似。与此同时,研究区不同的生态系统服务需求水平也存在较大差异。其中,依据自然断点法热岛调节服务需求较高值区域占比最高(大于 30%),广泛分布于中部区域,主要原因是大湾区地表温度普遍较高,而中部多为建成区,植被覆盖率较低,地表散热能力较差,同时,中部区域单元人口密度较大,对城市热缓解呈现较高需求。雨洪调节服务需求低值区域最大(约 80%),总体呈现出较低的需求水平,其多分布于大湾区周边区域;而高需求水平区域仅约为 10%,且集中分布于大湾区中部。主要原因为其需求主要受地势、地表及人口结构等多重因素的综合影响,地势低洼且不透水面广布的区域易形成雨水滞留,同时,人口及产业密度的区域呈现更高的人口暴露度及脆弱性。

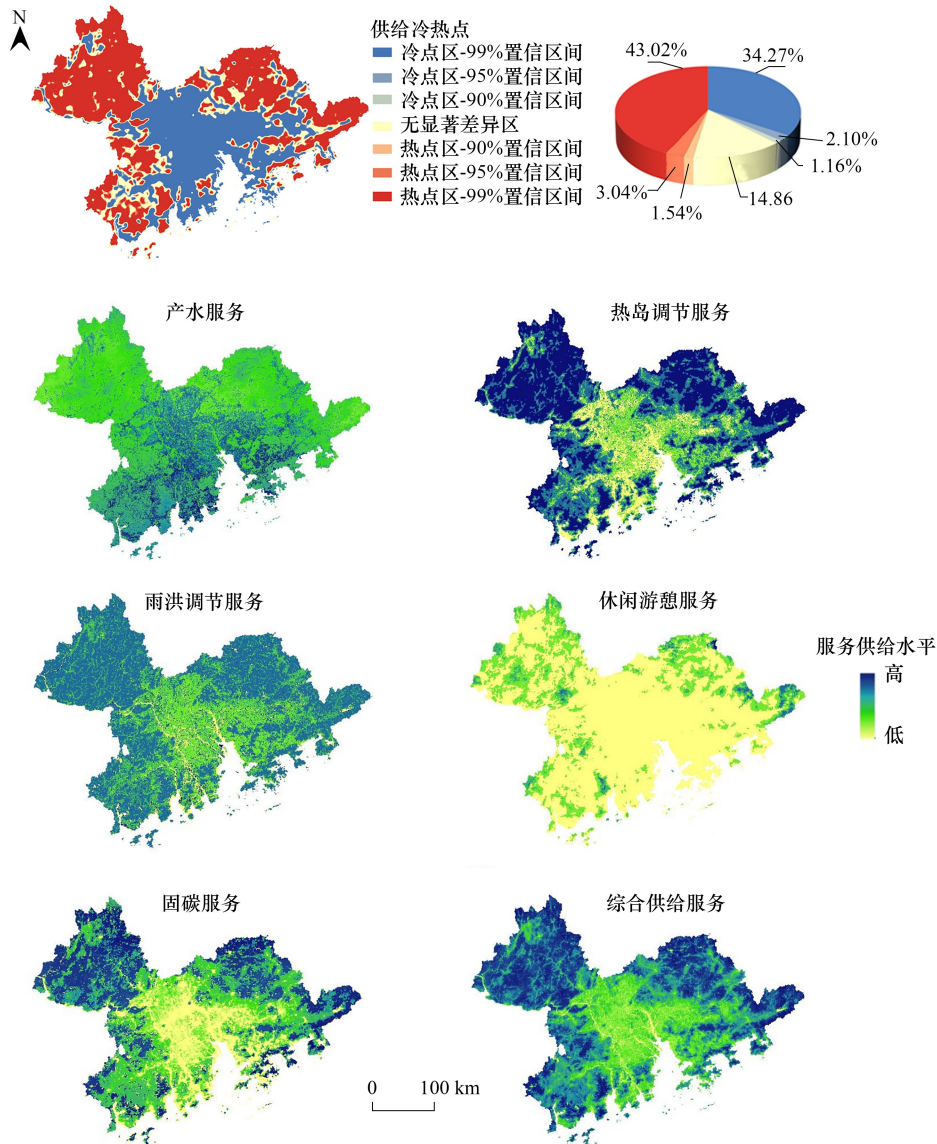


图 3 综合供给热点分析图

Fig.3 Map of comprehensive supply hotspot analysis

3.2.2 生态系统服务重要需求区分布特征

供需匹配与热点分析结果显示,区域各项服务重要需求区多集中于人口及经济密度较高的中部区域(图 5),且规模差异较大。其中热岛调节服务需求区空间分布最广且规模最大,其总面积约为 11441.04km²,占比高达 20.62%。主要原因是地表温度对区域人口和建设用地分布较为敏感,两者在粤港澳大湾区中部分布广泛且热点空间范围大,因此热岛调节需求面积规模大且空间分布广泛。需求区面积分布最小为固碳服务需求区,因其需求对高密度人口及产业分布影响较为敏感。该服务的需求高热点区域(约为 10%)多集中于人口及产业高密度区域。

3.3 生态安全网络

3.3.1 生态源地

生态源地由 53 个综合服务供给水平较高的生态斑块构成(图 6),总面积约为 23201.75km²,约占粤港澳大湾区陆地面积的 41.82%。其中最小源地面积为 8.20km²,最大的斑块面积高达 9983.79km²,位于拥有大湾

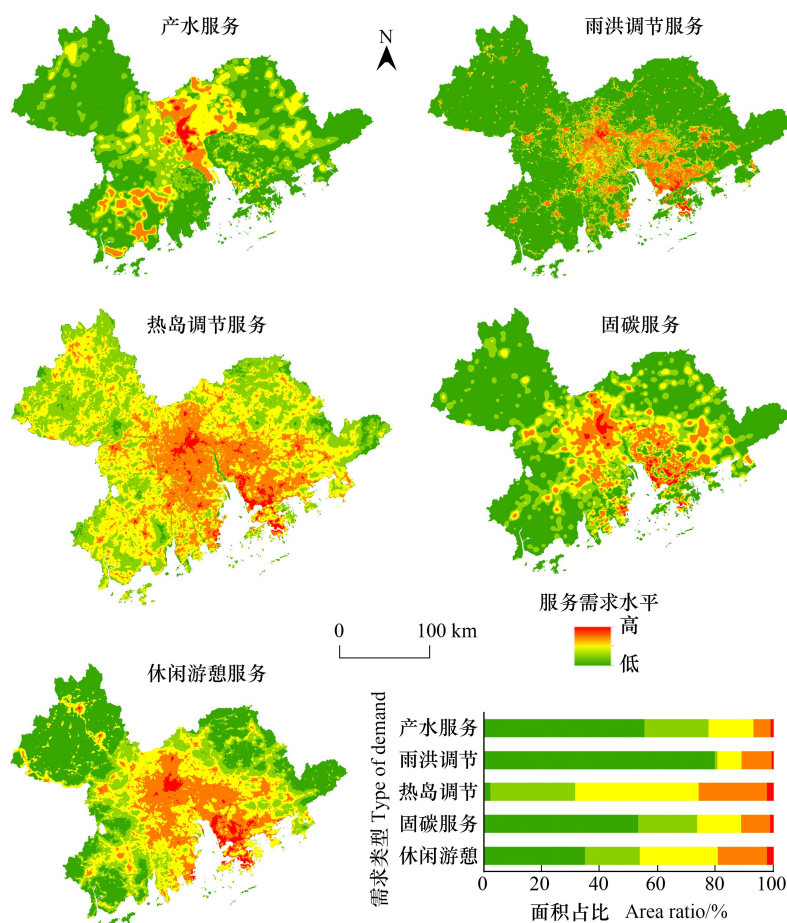


图4 生态系统服务需求空间分布特征

Fig.4 Demand of ecosystem services

区“绿肺”之称的肇庆市。大湾区的生态源地连片程度较高,主要分布于大湾区四周,连片的高质量生态系统形成了区域天然的自然屏障与生态系统服务供给源。

3.3.2 居民福祉提升生态网络

(1) 基础生态安全网络

基础生态网络以各生态源地之间的生态廊道作为连接纽带,本研究识别出源地间共有 115 条源地间生态廊道,全长约为 3045.87km,主要分布于建成区周边区域(图 7)。受城市空间分布的影响,西南部的江门市、东北部的惠州市等区域的生态源地呈规模小、数量多且较为破碎的特征,生态廊道则呈网状分布。

(2) 福祉提升网络

本研究共提取出 21 条产水服务供需廊道,总长约为 696.51km,主要呈北部大型生态源地向中心城区进行水源供给的特征。其中东北部产水服务供需廊道分布较多,西北部分布相对较少。(图 7)。因服务流向限制,本研究共提取了 20 条雨洪调节服务供需廊道,总长约为 406.02km,主要呈现中心城区向南部低洼源地排水的特征。

其次,本研究基于累积多年风向数据进行模拟提取了风廊,连通了源地与热岛调节服务需求区及固碳服务需求区。本研究提取了 26 条“源地-需求区-源地”的源需冷热双向流动的热岛调节廊道,总长约为 394.68km,主要呈现中心城区周围大循环的特征。其中冷风主要由大湾区东部的生态源地进入热岛服务重要需求区,热风主要由需求区吹向大湾区西部的源地斑块(图 7)。这些廊道提升了需求区内部的空气流动效

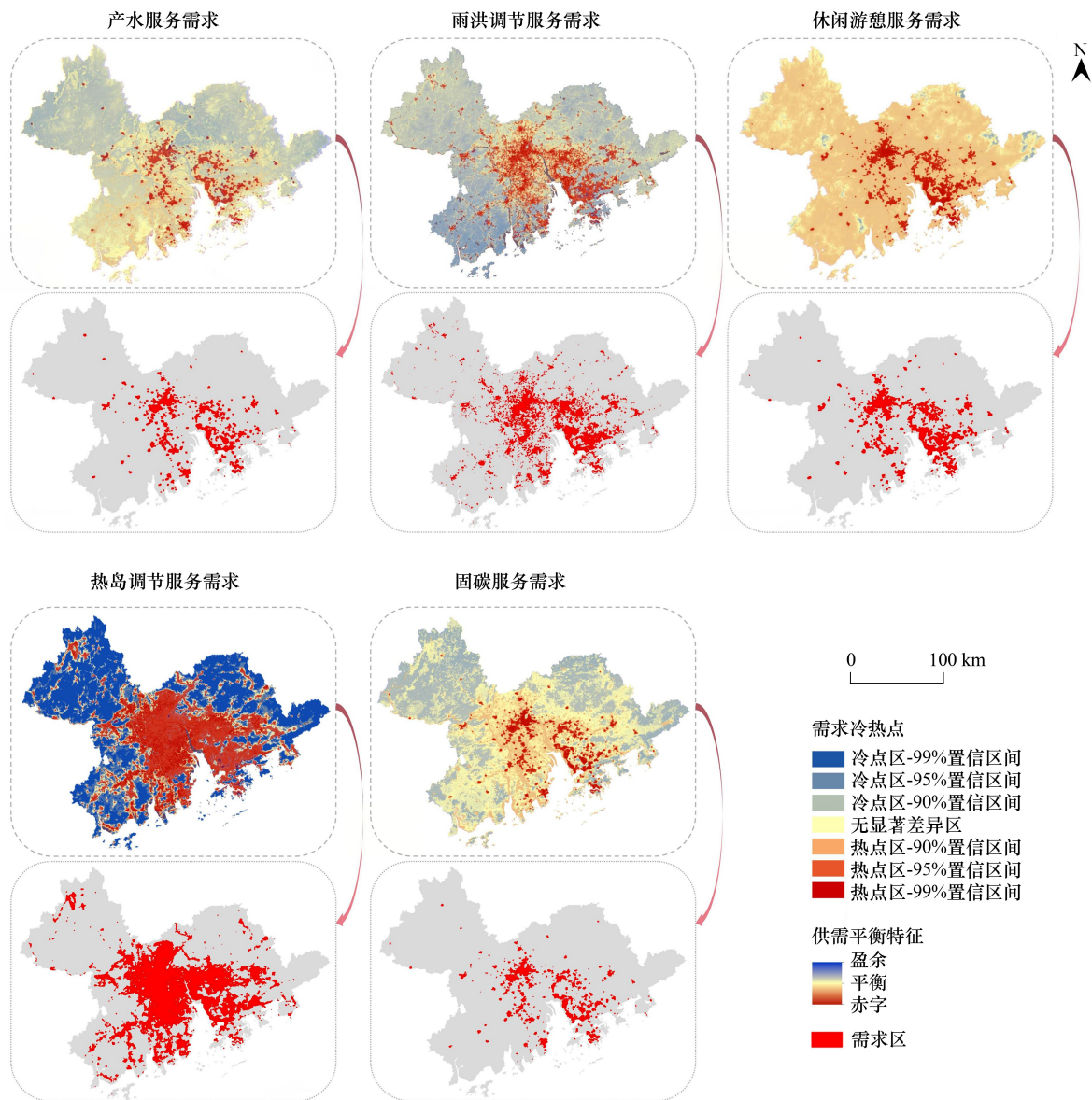


图 5 生态系统服务需求区分布图
Fig.5 Distribution map of each demand area

率,在一定程度可调节需求区温度。而固碳服务风廊则主要通过大气环流将重要需求区中的未固定碳输送到南部的生态源地。同时受风向影响,固碳服务风廊共提取 13 条,总长约为 166.65km,主要呈现由中心城区向南部细小源地和海洋区域的指向特征。

本研究共识别出 130 条休闲廊道,总长约为 1529.30km。受交通可达性的影响,休闲廊道总体呈现出需求区与其近距离源地的广泛分布特征。平均廊道长度为 11km,最短的廊道仅为 1.98km。短距离休闲廊道通过区域路网进一步满足较远距离的人口聚集区域的休憩需求。

3.3.3 生态夹点

大湾区第一类生态夹点(源地间)共有 58 处,总面积约 2302.27km²(图 8)。主要分布在生态廊道较密集的城市远郊区,其中江门市境内的生态夹点较多,共有 21 处,总面积约为 525.19km²。粤港澳大湾区第二类生态夹点(生态廊道与供需廊道间)共有 49 处,以点状形式多分布于大湾区东部及南部区域,如江门、东莞、惠州等。

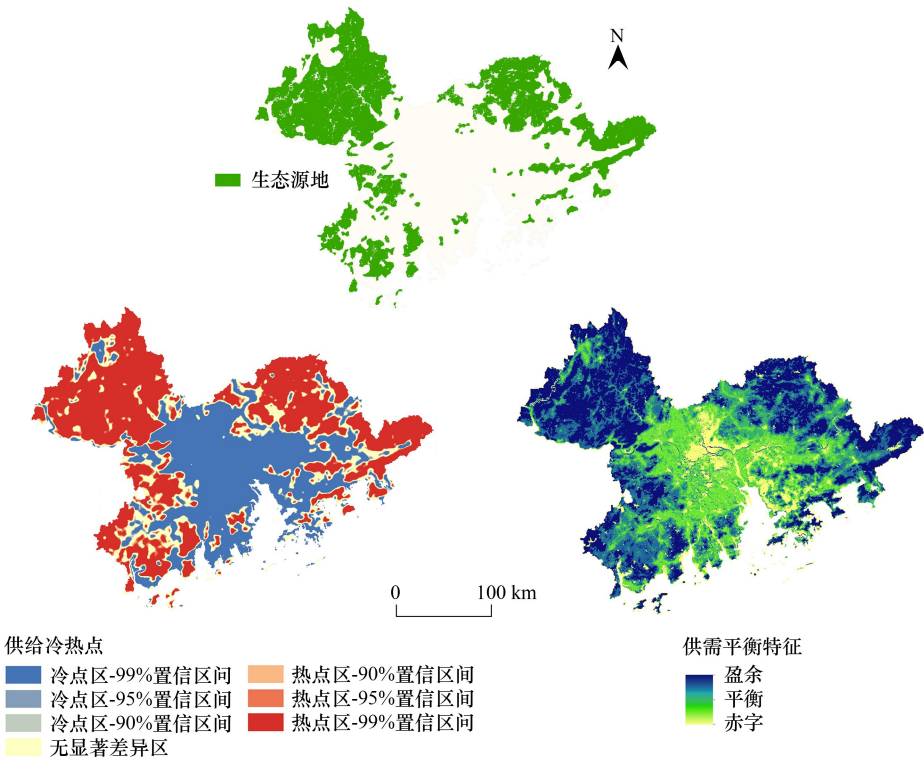


图 6 生态源地

Fig.6 Ecological source

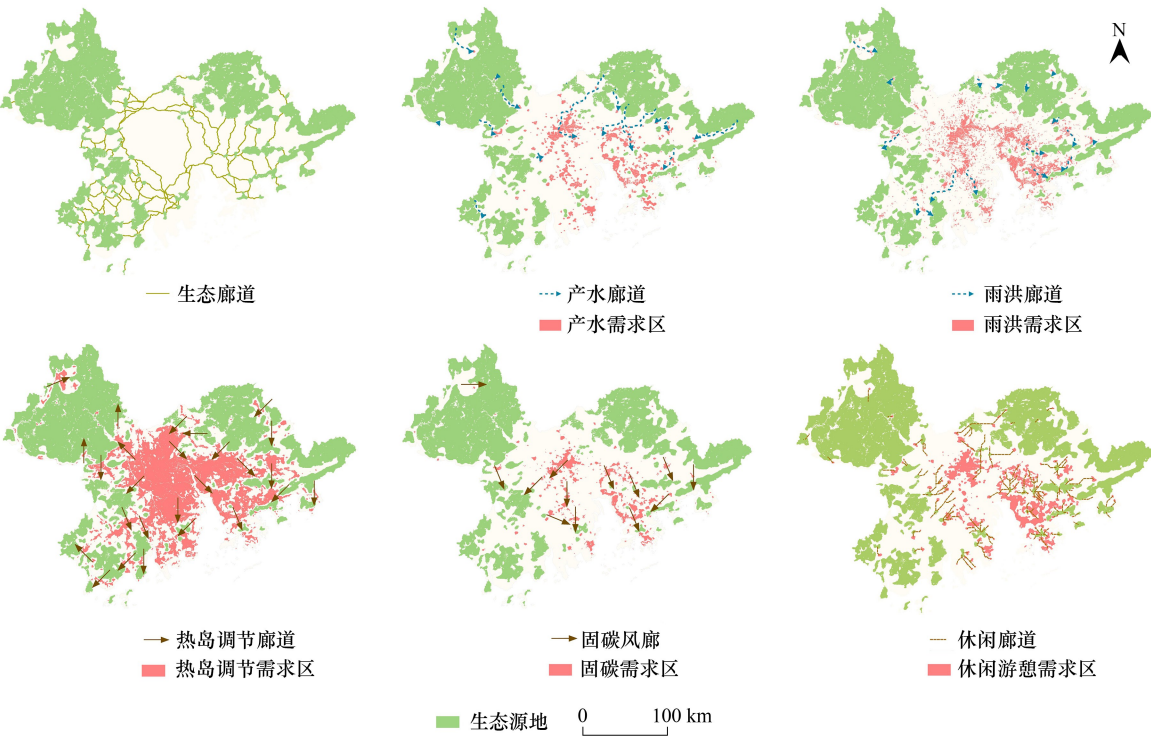


图 7 潜在生态廊道及各项生态系统服务供需廊道

Fig.7 Potential ecological corridors and corridors of supply and demand for various ecosystem services

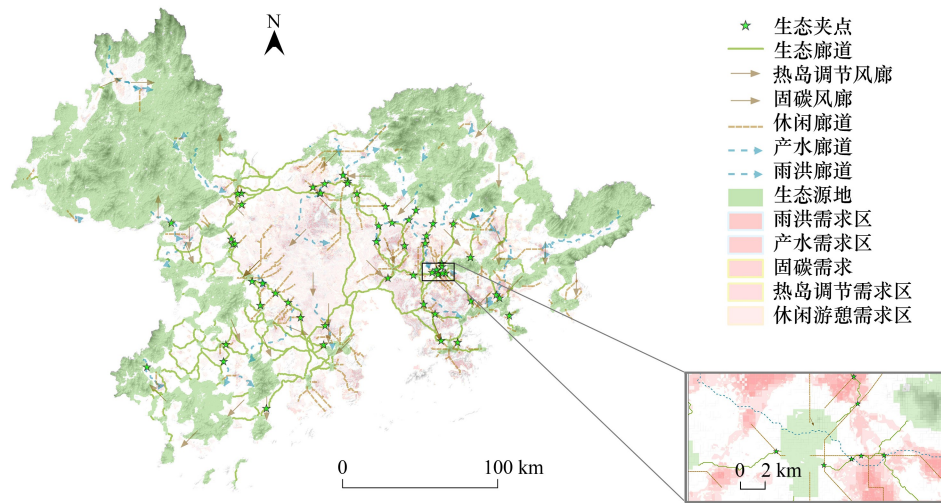


图8 粤港澳大湾区生态福祉提升网络

Fig.8 Ecological Well-being Enhancement Network of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

3.3.4 居民福祉提升的生态网络宏观优化方案

面向粤港澳大湾区生态系统服务供需错配的主要矛盾,基于不同类别廊道的主导分布与走向特征,结合本区域山水林田湖草等要素的现状分布特征,本研究提出“一圈一带五廊道”(图9)的居民福祉提升生态网络宏观优化方案。

首先依据基础生态安全网络分布特征,提出城区外围串联各源地的基础安全生态保护修复圈。需加强对本圈层重要生态节点保护修复和拓宽廊道宽度,提高廊道连通性。同时开展生态保育工程,减少人类活动干扰,降低源地间生物流动阻力,打造区域优质生态屏障。

其次根据交通路网、休闲廊道走向,提出呈半包围状分布于城区边缘,并贴近城郊生态质量较高区域的环城休闲游憩带。需借助自然风光,结合地方文化特色,打造该带成为生态特色观光长廊,提升其景观多样性与质量,满足居民多样化文化审美需求。

再次依据风廊及地势、水系等空间要素的现状与走向,提出碳输送保护修复廊道、城区热缓解廊道与郊区冷却通风廊道。其中,碳输送保护修复廊道主要分布于大湾区西南部,需优化植被与土地利用结构,增强沿线植被、土壤等碳库固碳能力。城区热缓解廊道由中部需求区流向西北部源地。需适当拓宽沿线街道宽度,降低地表粗糙度,同时增设绿地空间和加强水域保护修复,增强城市热缓解能力。郊区冷却通风廊道可将东部源地冷流沿低洼风向送往东南部等重要需求区,需适当降低沿线区域建筑密度及高度和提高沿线植被覆盖度,优化城市通风环境。

最后根据水廊道及地势等空间要素的现状与走向,提出水资源供需保护修复廊道及城市内涝缓解廊道。其中,水资源供需保护修复廊道主要由北部水系沿地势流向中部、东南部需求区,需适当控制上游区域人类活动强度,以降低上游水源污染压力。沿线区域需加强小流域协同综合治理,保护和修复河流环境,优化供需廊

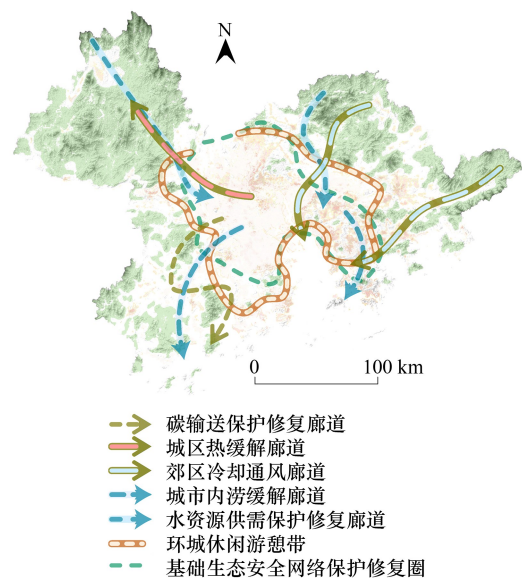


图9 粤港澳大湾区生态网络优化

Fig.9 Optimization of the ecological network in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

道水源环境,满足居民优质水源需求。内涝缓解廊道则主要通过水系及地势走向将中部与东南部城区的内涝水引向海域。需适当清理沿线水域淤沙,减少泥沙堆积,并在沿线增设绿化带,提高植被覆盖度,以优化廊道内涝调节能力。

4 讨论与结论

4.1 讨论

(1) 与现有相关研究的比较及未来改进方向

本研究基于不同生态系统服务需求类型差异,根据不同部门的实际需求,结合居民活动 POI 点的空间核密度精细直接刻画了差异化生态系统服务需求,生态系统服务受益对象的空间分布较为清晰。本研究总体表达了态系统服务供需流动差异化路径,形成了较好的福祉提升生态网络,可有效应用于生态福祉提升实践。

从生态系统服务供给到需求的流的路径刻画效果来看,目前学者们主要获取到全位、原位流,定向流刻画不足^[17],主要原因可能是受供需综合评估所致。本研究在定向流识别上进行了探索。未来定向描述需更好结合当前生态系统服务流的研究^[18,46-47],特别需增加考虑除了流向以外的流量和流速^[48-50]。在描述人类主动获取生态系统服务路径时,可达性是主要的路径识别工具。当前研究和本研究均通过交通可达性和成本距离方法识别需求到供给的路径。这些方法对于景观、休憩服务等文化服务识别效果较好,但对于调节服务还需更进一步探索其实现机制。

此外,在基础安全网络的构建上,应该考虑更多的区域基本生态系统服务,如土壤保持、生境质量、防风固沙等。同时也要考虑行政区外生态系统服务供给对网络构建的影响。进一步强化基本生态保育的基础上才能更好拓展生态网络,实现提升居民生态福祉目标。在需求测度上,本文依赖 POI 数据开展核密度分析,未来需进一步增强需求的表征手段和维度,如采用互联网人口流动大数据进行表征。本文还以供给赤字及热值最高的区域作为各项服务需求区,具有一定的科学和合理性,但如果能进一步根据需求的强度及其空间范围,提出需求区的阈值,可更准确地实现需求的空间精细化刻度。

(2) 廊道间空间叠加效应与福祉提升策略

本研究识别了多种类型的供需廊道,这些廊道在空间上有两种交互形式。一是线状相交形式。该形式存在一定程度的潜在冲突。可通过定义廊道之间的交点为生态夹点的方式来开展生态保护修复,以缓解潜在冲突。二是平行叠加方式。不同类型的供需廊道通常具有功能协同或冲突效应。本研究在构建最终的“一圈一带五廊道”优化方案时,发现存在部分重叠的廊道主要有两对:热缓解廊道和水资源保护廊道,以及基础生态修复网络和环城休憩网络。这两对廊道功能上存在较好的协同效应,如水资源供给廊道既可输送水资源,亦可辅助降温。本优化方案未将功能潜在冲突廊道(如水输送廊道和休憩廊道)纳入。但是在生态福祉提升网络中,确实存在一些潜在的潜在功能冲突的叠加区域。未来在应用该网络时,建议采取一定的平行间隔进行廊道的空间布局。

此外,对照本区域已有战略规划和一些相关的研究,其大都构建了基础生态安全网络,且这些网络的分布特征与本研究的基本一致^[10-11]。如广东国土空间规划设置了珠三角外围国土生态屏障带,广东省重要生态系统保护和修复重大工程总体规划设置了粤港澳大湾区外围丘陵浅山生态屏障,这些屏障与本研究基础生态网络的空间范围基本一致。但总体而言,相关规划和研究均未能识别出满足居民生态系统服务需求的网络系统,不利于居民生态福祉提升和区域高质量发展。未来福祉提升策略是加强基础生态安全网络的保护修复,提升两类生态夹点的物质与能量流动的枢纽功能,同时以“一圈一带五廊道”方案为框架设置福祉提升网络,具体空间布局措施在上述优化方案中已有阐述。

4.2 结论

(1) 生态系统服务供给是福祉产生的基础,源地间供给网络构成基础生态安全网络。居民福祉提升的生态网络则有两种实现路径,即居民通过生态系统服务扩散效应所自动形成的服务流(顺势差)获取生态产品

与服务,以及在需求驱动下居民跨越空主动消费、使用产品及服务(逆势差)。面向大都市区居民生态福祉提升网络应侧重满足精细化、差异化、高层次生态系统服务需求。

(2)粤港澳大湾区的生态系统服务供给与需求分别呈现出“四周高、中部低”及“中部高、四周低”的供需空间错配现象。在此基础上,研究识别出 53 个生态源地斑块,总面积约为 23201.75km²,占区域总面积的 41.82%,斑块内部以林草地为主;并分别识别出各生态系统服务需求区,总面积约为 23651.13km²,占区域总面积的 42.63%。各需求区规模和空间分布差异较大,规模大小依次为:热岛调节需求区、休闲游憩服务需求区、雨洪调节服务需求区、产水服务需求区、固碳服务需求区。

(3)研究区基础生态安全网络中共 115 条廊道,呈网状分布于建成区周边区域,全长约为 3045.87km。生态福祉提升网络中产水廊道、雨洪调节服务供需廊道、热岛调节廊道、固碳服务风廊、休闲廊道分别为 21 条、20 条、26 条、13 条、130 条,共 3193.16km。各福祉提升网络依成因和生态系统服务供需分布特征呈现差异化格局。大湾区两类生态夹点共有 107 处,总体程环状分布于城市与自然生态空间的过渡区域。

(4)面向粤港澳大湾区生态系统服务供需错配的主要矛盾,基于不同类别廊道的主导分布与走向特征,结合本区域山水林田湖草等要素的现状分布特征,形成了研究区“一圈一带五廊道”的居民福祉提升生态网络宏观优化方案及相关保护修复建议。其中,“一圈”为基础生态安全网络保护修复圈,“一带”为环城休闲游憩带,“五廊道”分别为碳输送保护修复廊道、城区热缓解廊道、郊区冷却通风廊道、水资源供需保护修复廊道及城市内涝缓解廊道。

参考文献(References):

- [1] United Nations. Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development//Sustainable Development Goals. Nomos/Hart, 2022.
- [2] De Neve J E, Sachs J D. The SDGs and human well-being: a global analysis of synergies, trade-offs, and regional differences. *Scientific Reports*, 2020, 10: 15113.
- [3] Tang X Z, Huang X, Tian J W, Pan S Y, Ding X, Zhou Q W, Sun C Z. A novel framework for the spatiotemporal assessment of urban flood vulnerability. *Sustainable Cities and Society*, 2024, 109: 105523.
- [4] Wu X T, Fu B J, Wang S, Song S, Lusseau D, Liu Y X, Xu Z C, Liu J G. Bleak prospects and targeted actions for achieving the Sustainable Development Goals. *Science Bulletin*, 2023, 68(22): 2838-2848.
- [5] 傅伯杰, 张军泽. 全球及中国可持续发展目标进展与挑战. *中国科学院院刊*, 2024, 39(5): 804-808.
- [6] 孙传璋, 李鹏, 邓羽, 张昌顺. 基于生态系统空间异质性的美丽中国生态建设分区. *地理学报*, 2022, 77(11): 2902-2919.
- [7] 李琰, 李双成, 高阳, 王羊. 连接多层次人类福祉的生态系统服务分类框架. *地理学报*, 2013, 68(8): 1038-1047.
- [8] Liu Y X, Fu B J, Wang S, Rhodes J R, Li Y, Zhao W W, Li C J, Zhou S, Wang C X. Global assessment of nature's contributions to people. *Science Bulletin*, 2023, 68(4): 424-435.
- [9] 杨宜男, 李敬, 王立, 王子豪, 姚晨心, 王原. 长三角地区城市化对典型生态系统服务供需的影响. *自然资源学报*, 2022, 37(6): 1555-1571.
- [10] 柯钦华, 周俏薇, 庄宝怡, 孙传璋. 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研究. *生态学报*, 2024, 44(5): 1765-1779.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Wu J S, Fan X N, Li K Y, Wu Y W. Assessment of ecosystem service flow and optimization of spatial pattern of supply and demand matching in Pearl River Delta, China. *Ecological Indicators*, 2023, 153: 110452.
- [14] 王晨旭, 刘焱序, 于超月, 苏冲, 张文新. 面向居民生态福祉的国土空间生态网络构建——以临沂市为例. *生态学报*, 2022, 42(21): 8650-8663.
- [15] 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.
- [16] Liu X, Han Y, Li Y H, Li L J, Liu Y X. Construction of ecological network in Daihai Basin based on ecological security pattern and ecological service accessibility. *Ecological Frontiers*, 2024, 44(6): 1224-1231.
- [17] Tian H Z, Wang H, Lyu X, Li X B, Yang Y L, Zhang Y, Liu J H, Lu Y T, Zhao X L, Qu T F, Su J R, Luo D S. Construction and optimization of ecological security patterns in Dryland watersheds considering ecosystem services flows. *Ecological Indicators*, 2024, 159: 111664.
- [18] 梁坤宇, 金晓斌, 张晓琳, 宋家鹏, 李权荃, 应苏辰, 祁翌, 周寅康. 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. *生态学报*, 2024, 44(9): 3880-3896.
- [19] 刘晶晶, 王静, 戴建旺, 翟天林, 李泽慧. 黄河流域县域尺度生态系统服务供给和需求核算及时空变异. *自然资源学报*, 2021, 36(1):

- 148-161.
- [20] Ouyang X, Wang Z B, Zhu X. Construction of the ecological security pattern of urban agglomeration under the framework of supply and demand of ecosystem services using Bayesian network machine learning: case study of the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration, China. *Sustainability*, 2019, 11(22): 6416.
- [21] Zhang Y, Hu W Y, Min M, Zhao K, Zhang S Y, Liu T. Optimization of ecological connectivity and construction of supply-demand network in Wuhan Metropolitan Area, China. *Ecological Indicators*, 2023, 146: 109799.
- [22] 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.
- [23] Fedele G, Locatelli B, Djoudi H. Mechanisms mediating the contribution of ecosystem services to human well-being and resilience. *Ecosystem Services*, 2017, 28: 43-54.
- [24] Dee L E, Allesina S, Bonn A, Eklöf A, Gaines S D, Hines J, Jacob U, McDonald-Madden E, Possingham H, Schröter M, Thompson R M. Operationalizing network theory for ecosystem service assessments. *Trends in Ecology & Evolution*, 2017, 32(2): 118-130.
- [25] 彭保发, 郑俞, 刘宇. 耦合生态服务的区域生态安全格局研究框架. *地理科学*, 2018, 38(3): 361-367.
- [26] 王军, 彭建, 傅伯杰. 关于粤港澳大湾区一体化生态保护修复的思考与建议. *中国科学院院刊*, 2023, 38(2): 288-293.
- [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] 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.
- [29] Bose S, Mazumdar A. Urban flood risk assessment and mitigation with InVEST-UFRM model: a case study on Kolkata city, West Bengal state (India). *Arabian Journal of Geosciences*, 2023, 16(5): 320.
- [30] 刘宪锋, 任志远, 林志慧. 青藏高原生态系统固碳释氧价值动态测评. *地理研究*, 2013, 32(4): 663-670.
- [31] 徐迪航, 欧阳志云, 韩宝龙. 深圳市生态系统日常休憩服务供需关系及其变化趋势特征. *扬州大学学报: 农业与生命科学版*, 2021, 42(5): 104-110.
- [32] Liu H X, Remme R P, Hamel P, Nong H F, Ren H. Supply and demand assessment of urban recreation service and its implication for greenspace planning—a case study on Guangzhou. *Landscape and Urban Planning*, 2020, 203: 103898.
- [33] 梁秀娟, 王旭红, 牛林芝, 韩海青, 郑玉蓉, 张秀. 大西安都市圈城市热岛效应时空分布特征及 AOD 对热岛强度的影响研究. *生态环境学报*, 2020, 29(8): 1566-1580.
- [34] 赵欣, 赵凯旭, 黄晓军. 基于 ECOSTRESS 地表温度和手机信令数据的城市人口热环境暴露风险评价——以西安市为例. *地理科学进展*, 2022, 41(11): 2061-2072.
- [35] 杨智威, 陈颖彪, 吴志峰, 郑子豪, 李娟娟. 粤港澳大湾区城市热岛空间格局及影响因子多元建模. *资源科学*, 2019, 41(6): 1154-1166.
- [36] 张会, 李铖, 程炯, 吴志峰, 吴艳艳. 基于“H-E-V”框架的城市洪涝风险评估研究进展. *地理科学进展*, 2019, 38(2): 175-190.
- [37] 黄国如, 李碧琦. 基于模糊综合评价的深圳市暴雨洪涝风险评估. *水资源与水工程学报*, 2021, 32(1): 1-6.
- [38] Hegetschweiler K T, de Vries S, Arnberger A, Bell S, Brennan M, Siter N, Olafsson A S, Voigt A, Hunziker M. Linking demand and supply factors in identifying cultural ecosystem services of urban green infrastructures: a review of European studies. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017, 21: 48-59.
- [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] 朱文博, 李双成, 朱连奇. 中国省域生态系统服务足迹流动及其影响因素. *地理研究*, 2019, 38(2): 337-347.
- [41] Chen Z L, Lin J Y, Huang J L. Linking ecosystem service flow to water-related ecological security pattern: a methodological approach applied to a coastal province of China. *Journal of Environmental Management*, 2023, 345: 118725.
- [42] 杨丽雯, 董丽青, 张立伟, 何秉宇, 张永清. 固碳服务供需平衡和服务流量化评估——以引黄入晋南干线为例. *资源科学*, 2019, 41(3): 557-571.
- [43] 党冰, 房小怡, 吕红亮, 程宸, 杜吴鹏, 刘勇洪, 张硕, 杨帆. 基于气象研究的城市通风廊道构建初探——以南京江北新区为例. *气象*, 2017, 43(9): 1130-1137.
- [44] 杨文涛, 苏文琪, 雷炳烽, 王茜, 方军. 基于多源地理数据的城市健身场地精细尺度空间可达性分析. *地理科学*, 2023, 43(9): 1559-1567.
- [45] Wang F Y, Wang K Y. Measuring spatial accessibility to ecological recreation spaces in the Pearl River Delta region: an improved two-step floating catchment area method. *Journal of Spatial Science*, 2018, 63(2): 279-295.
- [46] Wang C D, Li W Q, Sun M X, Wang Y T, Wang S B. Exploring the formulation of ecological management policies by quantifying interregional primary ecosystem service flows in Yangtze River Delta region, China. *Journal of Environmental Management*, 2021, 284: 112042.
- [47] Wang L J, Zheng H, Chen Y Z, Ouyang Z Y, Hu X F. Systematic review of ecosystem services flow measurement: Main concepts, methods, applications and future directions. *Ecosystem Services*, 2022, 58: 101479.
- [48] Su D, Cao Y, Dong X Y, Wu Q, Fang X Q, Cao Y. Evaluation of ecosystem services budget based on ecosystem services flow: a case study of Hangzhou Bay area. *Applied Geography*, 2024, 162: 103150.
- [49] Ma Y H, Chen H, Yang M M, Aihemaiti G, Lu W J, Zhao R J. Ecological compensation based on multiscale ecosystem carbon sequestration service flow. *Journal of Environmental Management*, 2024, 372: 123396.
- [50] Liang J, Pan J H. Identifying carbon sequestration's priority supply areas from the standpoint of ecosystem service flow: a case study for Northwestern China's Shiyang River Basin. *Science of The Total Environment*, 2024, 927: 172283.