

DOI: 10.5846/stxb202103220757

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.

Han Z L, Liu C H, Yan X L, Li X Y, Wang X Z. Coupling coordination and matches in ecosystem services supply-demand for ecological zoning management: A case study of Dalian. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(22): 9064-9075.

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

韩增林^{1,2,3}, 刘澄浩^{1,2}, 闫晓露^{1,2,4,*}, 李欣媛^{1,2}, 王学哲³

1 教育部人文社科重点研究基地, 海洋经济与可持续发展研究中心, 大连 116029

2 辽宁师范大学海洋可持续发展研究院, 大连 116029

3 辽宁师范大学地理科学学院, 大连 116029

4 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241

摘要: 生态管理分区是建设用地扩张指引和生态空间管控的重要依据, 对维护区域生态安全和生态文明建设具有重要意义。以我国北方沿海重要中心城市——大连市为例, 选取食物供给、水源涵养、固碳释氧、土壤保持、生境维持和美学景观 6 项指标, 综合运用模型法及生态经济学方法量化生态系统服务供给, 并结合土地利用、人口和经济现状定量评估 2015 年生态系统服务需求。利用象限匹配法和耦合协调度模型, 探究千米网格尺度下生态系统服务供需匹配关系和协调关系及其区域差异, 进而通过空间叠置分析划分生态管理分区并提出相应管理措施, 旨在为区域内生态修复以及差异化建设提供科学参考。研究结果表明: ①大连市生态系统服务供需具有显著空间异质性, 总体呈现北部林地和东西部沿海生态系统服务供给高、需求低, 中南内陆城镇区生态系统服务供给低、需求高的空间格局; ②生态系统服务供需不匹配和失调特征明显, 匹配类型以高供给—低需求和低供给—高需求为主, 生态系统服务供需耦合协调度平均值为 0.38, 表现为轻度失调; ③综合分析将大连分为 4 个生态管理区, 其中, 生态涵养区为高供低需-供需失调区, 要以保护为主培育为辅, 重点保护; 生态农业区为高需-供需平衡区, 以生态保护和生态建设为主, 提高其投入产出效率; 生态改良为低供高需-供需失调区, 以生态建设和整治为主, 综合改善生态系统服务水平; 生态一般保护区为高供-供需失调区, 以综合保护为主, 提高生态溢出效应。

关键词: 生态系统服务供需; 生态管理分区; 耦合协调; 网格尺度; 空间异质性

Coupling coordination and matches in ecosystem services supply-demand for ecological zoning management: A case study of Dalian

HAN Zenglin^{1,2,3}, LIU Chenghao^{1,2}, YAN Xiaolu^{1,2,4,*}, LI Xinyuan^{1,2}, WANG Xuezhe³

1 Key Research Base of Humanities and Social Sciences of the Ministry of Education; Center for Studies of Marine Economy and Sustainable Development, Dalian 116029, China

2 Institute of Marine Sustainable Development, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

3 School of Geography, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

4 State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China

Abstract: Ecological management zoning is an important basis for construction land expansion guidelines and ecological

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42101113, 41976206); 教育部人文社会科学研究项目 (21YJCZH193); 河口海岸学国家重点实验室开放基金资助课题 (SKLEC-KF202107)

收稿日期: 2021-03-22; 接收日期: 2021-10-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xlyan@lnnu.edu.cn

space management, and is of great significance to maintain regional ecological security and ecological civilization construction. Taking Dalian, a coastal city in northern China, as an example, six indicators including food supply, water retention, carbon sequestration and oxygen release, soil conservation, habitat support, and aesthetic landscape are selected, and ecological economics methods are used to quantify the supply of ecosystem services (ES). We combined land use, population, and economic status to quantitatively assess the ES demand in 2015. Using the quadrant matching method and the coupling coordination degree model, we explore the matching relationship and coordination relationship of ES supply-demand and its regional differences at the 1 km grid scale. Then we divide the ecological management zone via spatial overlay analysis and propose management measures. It can provide scientific references for ecological restoration and differentiated construction in the region. The results show that: ① the supply and demand of ES in Dalian has significantly spatial heterogeneity, and overall there is a space with high supply and low demand for ES in northern forests and east and west coastal area, and low ES supply and high demand in central and southern inland urban areas. ② The ES supply-demand mismatch and imbalance characteristics are obvious. The matching types are mainly high supply-low demand and low supply-high demand. The average value of the coupling coordination degree of ES supply and demand is 0.38, which is a mild imbalance. ③ The comprehensive analysis divides Dalian into 4 ecological management zones. Among them, the ecological conservation zone is the high supply and low demand-supply and demand imbalance area, which should be protected as the main cultivation supplemented by the key protection; the ecological agriculture zone is high demand-supply and demand balance area, focusing on environmental protection and ecological construction, to improve its input and output efficiency; ecological improvement zone is a low supply and high demand-supply and demand imbalance area, focusing on ecological construction and renovation, and comprehensively improving the ES level; general ecological protection zone is a high supply-supply and demand imbalance area, which focuses on comprehensive protection to improve the ecological spillover effect.

Key Words: supply and demand of ecosystem services; ecological zoning management; coupling coordination; fishnet scale; spatial heterogeneity

生态系统服务是人类生存和发展的基础^[1]。然而,自工业革命以来,人类活动对人类赖以生存和发展的自然环境造成了严重破坏。世界上超过 60%的生态系统服务正在退化^[2],而且这些生态系统服务的丧失正变得越来越明显,深刻影响了人类福祉以及自然-社会-经济系统可持续发展,主要原因之一是缺乏对生态系统服务的有效管理^[3]。生态管理分区是生态修复和国土空间规划的重要依据,为提高人福祉和实现生态系统可持续发展提供了途径^[4]。正确理解生态系统服务供需关系是实施生态系统服务有效管理的前提条件,有助于改善人类福祉^[5]。人类福祉包括经济和社会福利,其依赖于对生态系统服务的消费,这将会导致生态系统服务供需之间的不平衡。由于自然资源禀赋和社会经济因素的差异,区域生态系统服务供需存在时空差异^[6],生态系统服务供需的时空变化识别面临挑战。如何识别和表征供需关系是分析供需空间特征的关键问题,同时,基于供需关系的生态系统服务的空间可视化也是将生态系统服务概念纳入生态系统管理决策和实施过程中的关键步骤。

随着生态系统服务研究的不断深入,越来越多的学者尝试从生态系统服务的角度来探讨生态管理分区,主要集中在生态系统功能^[7-8]、生态系统服务价值^[9-11]和生态系统服务簇^[12-13]等,生态系统服务作为生态系统与社会经济系统之间的桥梁,其状态不仅受生态系统结构和功能的影响,还受社会经济系统的影响^[14]。利益相关者的经济活动对生态系统服务产生了巨大需求,生态系统服务供需状态的变化使得政策制定者开始权衡相关宏观政策目标并开展生态系统服务供需关系的定量定性评价,通过划分不同的生态管理区进行管控,以提高人类福祉。而区域的生态管理同样会影响生态系统结构与功能,进而影响到生态系统服务供需关系^[15],生态系统服务供需关系与生态管理分区二者相辅相成。然而,基于生态系统服务供需关系的生态管理分区研究仍然较少,综合考虑生态系统的供给和利益相关者的需求进行生态系统服务管理,对促进生态系统和社会经济的可持续发展有重要意义。

生态系统服务中的供需关系分析有助于为环境管理提供信息^[16]。目前,关于生态系统服务供需关系的研究主要集中在以下方面:①探讨生态系统服务供需间权衡/负相关关系^[3,17];②生态系统服务流^[18-19];③从数量均衡与空间分布格局等方面量化生态系统服务供需不匹配/不平衡关系^[20-22]等。这些研究丰富了生态系统服务供需关系评估体系,反映出了生态系统服务供应状态及供给转化情况。然而,这些研究在表征生态系统服务可承载状态的同时,他们可能忽略了生态系统服务供需发展是否和谐一致和良性循环。生态系统服务供需耦合协调关系是衡量生态系统服务供需两系统间一致性和良性互动的一种方法,可以反映生态系统服务供需由无序走向有序的趋势^[4,23],反映出生态系统服务可持续性状态。因此,在进行生态管理分区时有必要综合考虑生态系统服务供需耦合协调和匹配关系,有助于真实反映生态系统服务状态并为生态系统服务的有效管理提供有效信息。此外,空间尺度上的生态系统服务供需关系研究集中在市域^[2]、县域^[15,19,24]、流域^[21]等大中尺度,格网等小尺度较少,而精细化的空间尺度更有利于实现土地精细化管理的目标^[25]。

沿海地区是由海洋和内陆共同形成的区域,人类经济活动频繁,生态环境相对脆弱^[2]。改革开放以来,我国沿海地区经济迅速发展,特别是沿海开放城市。大连作为我国首批对外开放的沿海城市之一,其产业发展以石油化工、船舶制造等重型工业为主,具有路径依赖性。尽管以重型工业为基础的经济模式对城市化加速和人类福祉做出了巨大贡献,却也催生了许多生态问题,如:城市用地挤占生态用地、近海工业污染、水土流失等,陆、海生态系统提供服务的能力降低,难以满足日益增长的人类需求,人地关系紧张。因此,大连市亟待统筹陆海,厘清生态系统服务供需关系,构建陆海统筹的生态管理分区。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

大连市位于辽东半岛南端,地处 120°98′—123°52′E、38°73′—40°22′N 之间,西临渤海,东临黄海(图 1),是中国重要的港口城市之一。属温带季风气候又兼具海洋性气候特征,地势呈现中心轴以东北-西南高、西北-东南低的特点,丘陵、山地、平原、滨海等地貌多样。区域内林地、湿地、自然保护区等资源丰富,是重要的生态区位,蕴含多种生态系统服务。气候、地势、地貌等的空间异质性导致大连市各区域生态环境的不同。截至 2015 年末,大连市下辖中山区、西岗区、沙河口区、甘井子区(为便于研究,将该四区合称为大连市区)、旅顺口区、金州区、普兰店区、庄河市和长海县。其中,大连市区是主要的人口集中地 and 经济发展地,其他区域相对较缓,区域不同的社会经济发展现状直接影响了生态系统服务需求的空间分布。

1.2 数据来源与处理

研究中使用的基础数据主要包括 2015 年土地利用、土壤、数字高程(Digital Elevation Model, DEM)、气象、归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、社会经济等数据。其中,土地利用数据基于遥感影像解译所得,根据研究需要,大连市土地利用类型化为 9 类:林地、耕地、湿地、草地、水体、海洋、水产养殖及盐田、建设用地和其它用地,空间分辨率 30 m,经检验 Kappa 指数为 0.81,结果可靠;土壤数据来自寒区旱区科学数据中心网站(<http://westdc.westgis.ac.cn/>)基于世界土壤数据库中国土壤数据集(V1.1),包括粉砂、粘粒、沙粒和有机碳含量,经 ArcGIS 10.2 重采样为 30 m 空间分辨率;DEM 数据来源于美国国家航空航天局网站(<http://reverb.echo.nasa.gov/>)ASTEM GDEM V2 数据集,空间分辨率 30 m;气象数据来自中国气象数据网站(<http://data.cma.cn/>)中国地面气候资料月值数据集,选取大连及邻近地区 12 个气象站点的降雨量、地表净辐射、平均温度和 2 m 处风速等数据,经 ArcGIS 10.2 反距离权重法空间插值得到空间分辨率 30 m 的气象栅格数据;NDVI 数据来源于美国国家航空航天局网站 MODIS13Q1 数据集的 16 d 合成产品,经 ArcGIS 10.2 最大值合成 2015 年 NDVI 栅格数据,重采样为 30 m;社会经济数据来源于《大连市统计年鉴》和《全国农产品成本收益资料汇编》。

2 研究方法

2.1 生态系统服务供需测算

基于千年生态系统评估对生态系统服务的分类,综合考虑大连市生态系统结构、社会经济条件以及数据

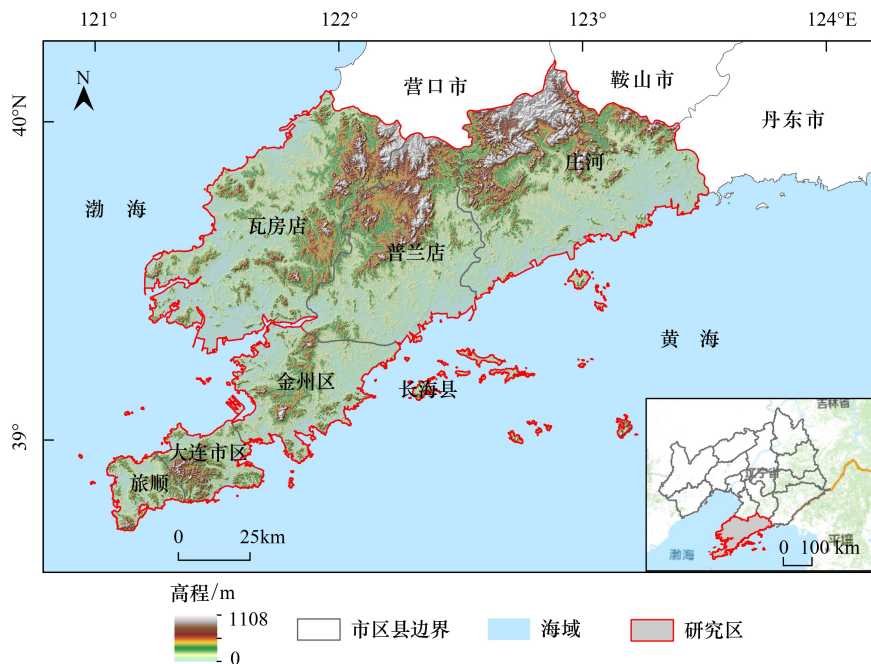


图1 研究区位置图

Fig.1 Location of the study area

的可获取性,选取6种典型生态系统服务:食物供给、固碳释氧、水源涵养、土壤保持、生境维持和美学景观。目前,有关生态系统服务供给测算的方法主要有模型法^[16-17,19]、专家经验判别法^[4,15,21]、能值法^[26]和价值法^[27]四种。价值法以生态经济学为理论基础采用货币评估生态系统服务供给,该方法虽然存在争议,但能粗略估计^[28],而且可以反映区域生态保护成效,提高相关者的重视程度,为政策制定者提供科学依据。模型法不受限于时空尺度^[29],弥补了部分指标非精细化缺陷。因此,本文选择以价值法为主,辅以模型法测算生态系统服务供给(表1),得到单位面积生态系统服务供给,则2015年大连市生态系统服务供给总量计算公式如下:

$$ESS = \sum_{i=1}^6 S_i \times A \quad (1)$$

式中,ESS为大连市生态系统服务供给(元);A为栅格面积(hm^2); S_i 为第*i*种生态系统服务类型的供给量($\text{元}/\text{hm}^2$), S_1 — S_6 分别代表食物供给、水源涵养服务供给、固碳释氧服务供给、土壤保持服务供给、生境维持服务供给、美学景观服务供给。

生态系统服务需求是人类对生态系统提供服务的数量及质量的偏好,包括已满足和未满足的部分^[38]。其反映了人类活动干扰的程度,不同的经济社会发展状况对生态系统服务需求不同。目前,国内外学者采用的生态系统服务需求量化方法主要包括两种:(1)从认知的角度,采用调查问卷的方式^[17,39],但该方法受限于受访者对生态系统服务了解程度;(2)指标法^[40-41],如彭建等选取建设用地占比、人口密度和地均GDP三个社会经济指标核算了广东省生态系统服务需求^[40],该指标体系由于计算简便得到国内学者广泛应用^[2-3,15,27]。其中,建设用地占比仅能反映出区域内建设用地对生态系统服务影响,而忽视了人类干扰活动同样较强的耕地、水产养殖等土地利用类型,面对同一区域内可能存在多种土地利用类型,以及各占不同面积比重,可以将不同的土地利用类型归属于不同土地利用强度下^[42],故本文采用土地综合利用强度指数代替建设用地占比。土地综合利用强度指数直接反映了人们对不同土地资源利用的差异,值越高,生态系统服务需求越高。人口密度可以直接反映生态系统服务的需求。地均GDP即国内生产总值密度,反映了地区发达程度,

可以间接体现人类对生态系统服务的需求。由于大连市地均 GDP 和人口密度的地区极端化较严重,因此采用统计学中取自然对数方法减缓剧烈波动带来的影响。

表 1 生态系统服务供给测评指标

Table 1 Indicators for assessment of ecosystem services supply

生态系统服务 Ecosystem services	评价指标 Indicators	计算方法 Methods	模型与数据 Models and datas
食物供给 Food supply	农林牧渔	市场价值法	$S_1 = \sum Q_i \times P_i \times A \ (i = \text{农产品, 林副产品, 畜牧产品, 水产品})$ Q_i 为 2015 年第 i 类物质生产能力 (t/hm^2); P_i 为第 i 类物质市场平均价格 (元/t); A 为产品销售平均利润率, 取 20% ^[30]
水源涵养 Water retention	水源涵养量	影子工程法	$S_2 = \sum WR \times C_r$ WR 为水源涵养量 (mm); C_r 为单位库容成本 (元/ m^3), 取 4.47 ^[31] ; 其中, $WR = \min\left(1, \frac{249}{\text{velocity}}\right) \times \min\left(1, \frac{0.9 \times TI}{3}\right) \times \min\left(1, \frac{K_{\text{sat}}}{300}\right) \times Y_x$; velocity 为流速系数; TI 为地形指数; K_{sat} 为土壤饱和导水率 (cm/d); Y_x 为栅格 x 产水量 (mm)。 产水量的计算基于 InVEST 模型产水量模块, 即 $Y_x = \left(1 - \frac{\text{AET}_x}{P_x}\right) \times P_x$; AET_x 为栅格 x 的年平均蒸散发量 (mm); P_x 为栅格 x 的年平均降雨量 (mm)
固碳释氧 Carbon sequestration and oxygen release	NPP	碳税率法、工业制氧法	$S_3 = \sum (1.63 \times P_c + 1.2 \times P_o) \times \text{NPP}$ NPP 为大连对应年份净初级生产力 (g/m^2); P_c 为固碳价格 (元/t), 取瑞典碳税率 150 美元/ t ^[32] ; P_o 为工业制氧成本 (元/t), 取 400 ^[30] ; NPP 的计算基于 CASA 模型, 即 $\text{NPP}(x, t) = \text{APAR}(x, t) \times \varepsilon(x, t)$; $\text{APAR}(x, t)$ 表示像元 x 在 t 月吸收的光合有效辐射 (MJ/m^2); $\varepsilon(x, t)$ 表示像元 x 在 t 月的实际光能利用率 ($\text{g C}/\text{MJ}$)
土壤保持 Soil conservation	土壤保持量	市场价值法、替代成本法	$S_4 = V_1 + V_2 + V_3$ V_1 为减轻泥沙淤积的经济效益 (元/ hm^2); V_2 减少土壤废弃的经济效益 (元/ hm^2); V_3 为保护土壤肥力的经济效益 (元/ hm^2); 其中, $V_1 = \sum S_c \times 24\% \times C_r \div \rho$; S_c 为土壤保持量 (t/hm^2); ρ 表示土壤容重 (g/cm^3), 取 1.37; $V_2 = \sum S_c \times B \div \rho \div d \div 10000$; B 表示 2015 年林业产值 (元/ hm^2); d 表示土壤平均厚度 (m), 取 0.5 ^[33] ; $V_3 = \sum S_c \times C_i \times P_i \div 1000$ ($i = \text{N, P, K, 有机质}$); C_i 为第 i 种土壤养分含量 (%); P_i 为 i 肥市场价格 ^[34] 。 土壤保持量的计算基于 RUSLE 模型, 即 $S_c = R \times K \times LS \times (1 - C \times P)$; R 表示降雨侵蚀性因子; K 表示土壤可侵蚀性因子; LS 表示坡长坡度因子; C 表示植被覆盖和作物管理因子; P 表示水土保持措施因子
生境维持 Habitat support	生境质量指数	价值转移法	$S_5 = \frac{Q_{xj}}{\bar{Q}} \times V_B$ Q_{xj} 为土地利用类型 j 中栅格 x 的生境质量指数, 无量纲; \bar{Q} 为研究区生境质量指数均值; V_B 为生物多样性基准价值 (元/ hm^2) ^[35] 。 生境质量指数的计算基于 InVEST 模型生境质量模块, 即 $Q_{xj} = H_j \times \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z}\right)\right]$; H_j 为土地利用类型 j 的生境适合性; D_{xj} 为土地利用类型 j 中栅格 x 所受胁迫水平; k 为半饱和常数; z 为归一化常量, 通常取值 2.5
美学景观 Landscape aesthetics	旅游收入	当量因子法	$S_6 = \sum \frac{1}{7} \times L_j \times \frac{S_j}{S} \times Q \times P_f \times \mu$ $\frac{1}{7}$ 表示生态系统服务价值当量系数 ^[36] ; L_j 表示研究区第 j 地类提供景观美学服务的单位面积价值当量因子 ^[35] , 其中水产养殖的取值参考水田、海洋参考水体 ^[37] ; S_j 为研究区当年第 j 地类的面积 (hm^2); S 表示研究区面积 (hm^2); Q 为研究区 2015 年平均粮食单产 (kg/hm^2), 取 3480; P_f 为 2015 年大连粮食的市场均价 (元/kg), 取 2.33; μ 为修正系数, 即大连市平均旅游收入与全国平均旅游收入比值, 取 18.08

$$\text{ESD} = \text{LDI} \times \ln P \times \ln G \quad (2)$$

$$\text{LDI} = 100 \times \left(\sum_{i=1}^n P_i \times Q_i \right) \quad (3)$$

式中,ESD 为生态系统服务需求; P 为人口密度(人/km²); G 为地均 GDP(元/km²);LDI 为土地综合利用强度指数; P_i 为研究区内第 i 级土地利用强度($i=1,2,3,4,5$)^[37]; Q_i 为研究区第 i 级土地利用类型所占面积百分比; n 为研究区土地利用强度分级数。

2.2 生态系统服务供需耦合协调和匹配分析

本研究以网格为研究单元探讨大连生态系统服务供需匹配和耦合协调关系,结合研究区大小及实际研究结果,利用渔网工具(Fishnet)创建 1 km×1 km 的网格。对基于以上方法量化得到的大连市生态系统服务供给量和需求量分别进行 z-score 标准化(式 4),以标准化后的需求量为 X 轴,标准化后供给量为 Y 轴构建二维坐标系,各网格的标准化需求、供给值构成(x, y)坐标点,得到 4 类供需匹配类型:高供给-高需求、高供给-低需求、低供给-低需求和低供给-高需求依次对应第一至四象限。

$$x = \frac{x_i - \bar{x}}{s} \quad (4)$$

式中, x 为 z-score 标准化后的供给量或需求量; x_i 为第 i 个网格的供给或需求; \bar{x} 为全市平均值; s 为全市标准差。

为消除供需量纲影响,对原始供给量和需求量进行极差标准化(式 5),将极差标准化后的结果进行生态系统服务供需耦合协调关系分析。耦合协调度模型在探讨生态系统生产总值-经济发展^[33]、经济-社会-环境^[43]、生产-生活-生态^[44]等系统间耦合协调关系取得广泛应用。因此,本文引入耦合协调度模型表征生态系统服务供给和需求两系统之间的耦合协调关系(式 6),反映二者之间彼此和谐一致的程度。

$$X = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (5)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (6)$$

$$C = 2 \times \sqrt{\frac{X_s \times X_d}{(X_s + X_d)^2}} \quad (7)$$

$$T = \alpha \times X_s + \beta \times X_d \quad (8)$$

式中, X 为极差标准化后的生态系统服务供给量或需求量; x_i 为第 i 个网格供给量或需求量; x_{\max} 为全市最大值; x_{\min} 为全市最小值; D 为供需耦合协调度, $D \in [0, 1]$, D 越大说明供需协调性越好; C 为耦合度; T 为供需综合协调指数; X_s 表示供给量; X_d 表示需求量; α 、 β 为待定系数,由于生态系统服务供给与需求同等重要,故取 $\alpha = \beta = 0.5$ 。采用等分法,并结合大连市实际发展情况,将生态系统服务供需耦合协调度划分为以下 8 个区间:① $D \in [0, 0.2]$,表明供需处于严重失调;② $D \in (0.2, 0.3]$,表明供需处于中度失调;③ $D \in (0.3, 0.4]$,表明供需处于轻度失调;④ $D \in (0.4, 0.5]$,表明供需处于濒临失调;⑤ $D \in (0.5, 0.6]$,表明供需处于基本协调;⑥ $D \in (0.6, 0.7]$,表明供需处于轻度协调;⑦ $D \in (0.7, 0.8]$,表明供需处于中度协调;⑧ $D \in (0.8, 1]$,表明供需处于良好协调。

3 结果与分析

3.1 大连生态系统服务供给空间特征分析

2015 年大连市生态系统服务供给为 469.6757 亿元(表 2),从各土地利用类型来看,生态系统服务供给能力最强的为林地和耕地,二者供给能力约占总供给的 76%,其它用地最低。空间上,供给高值主要分布在植被覆盖率高和近海地区(图 2),这里生态本底良好,生物多样;供给低值主要分布在城镇区,区域内多建设用地,人口密度大,人类活动频繁。从各生态系统服务来看,其供给能力呈现固碳释氧>美学景观>食物供给>水源涵养>生境维持>土壤保持的排列,此外,各生态系统服务供给均存在明显空间异质性。其中,食物供给 741.8457 万 t,经济价值 98.2449 亿元,其高值区主要分布于水产养殖和耕地,区域内农、渔业发达;研究区南部的食物供给较低,土地利用类型主要为建设用地和林地。水源涵养量 6.8705 亿 m³,经济价值 52.9807 亿

元,其高值区分布于研究区北部,林地水源涵养服务供给最高,达 29.6581 亿元;低值主要分布在湿地和海洋,主要是由于研究区内湿地包含滩涂和沼泽,面积不足研究区 1%。固碳释氧量 2.4580 亿 t,经济价值 149.1921 亿元,土壤保持量 24.2300 亿 t,经济价值 24.6514 亿元,二者空间分布类似,与研究区地形关系较为密切,呈现南北向中部倾斜格局。生境质量指数平均 0.65,生境维持经济价值 42.8192 亿元,美学景观经济价值101.7874 亿元,二者空间分布相似,与土地利用类型分布联系密切,林地表现能力最强,耕地次之,建设用地生境维持和美学景观服务供给均为 0。

表 2 2015 年大连市各土地利用类型生态系统服务供给/1×10⁸元

Table 2 Ecosystem services supply of each Dalian land use in 2015

土地利用类型 Land use	食物供给 Food supply	水源涵养 Water retention	固碳释氧 Carbon sequestration and oxygen release	土壤保持 Soil conservation	生境维持 Habitat support	美学景观 Landscape aesthetics	合计 Total
草地 Grassland	0.4692	0.9265	1.7387	0.2243	1.7671	2.3549	7.4807
耕地 Farmland	44.6484	21.2476	61.6686	5.5643	11.6462	10.3223	155.0974
海洋 Sea	0.5427	0.0003	0.0178	0.0066	0.0321	0.4439	1.0434
建设用地 Buildings	0.0000	0.8652	16.5187	1.6898	0.0000	0.0000	19.0737
林地 Forest	0.3625	29.6581	65.2675	16.7593	25.1696	65.7485	202.9655
其它用地 Unused land	0.0000	0.0406	0.4889	0.0451	0.3154	0.0218	0.9118
湿地 Wetland	0.0000	0.0062	0.2811	0.0050	1.1128	6.8695	8.2746
水产养殖及盐田 Sea culture	52.2221	0.1179	1.0946	0.1756	1.0404	2.0519	56.7025
水体 Water	0.0000	0.1183	2.1162	0.1814	1.7356	13.9746	18.1261
合计 Total	98.2449	52.9807	149.1921	24.6514	42.8192	101.7874	469.6757

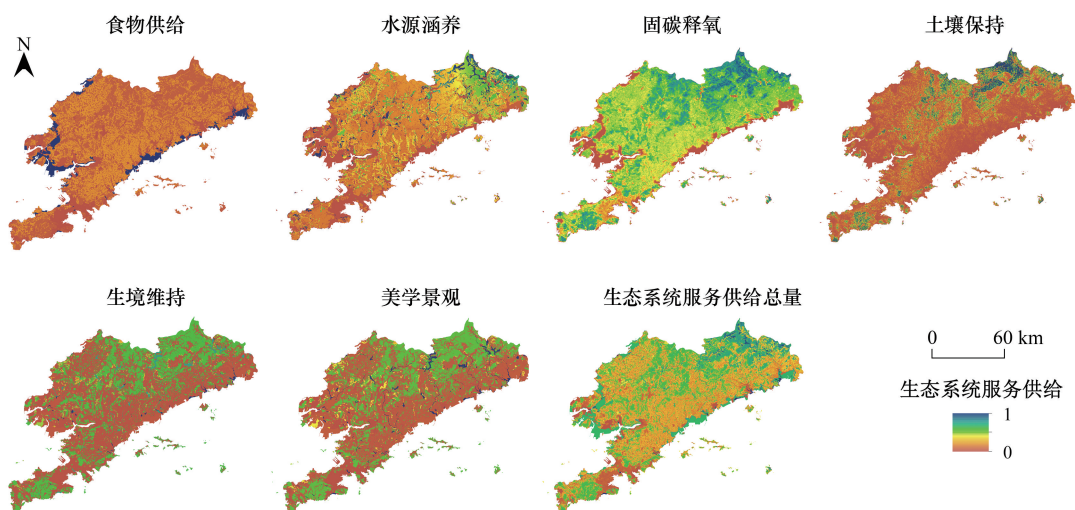


图 2 大连市各生态系统服务供给
Fig.2 Distribution of ecosystem services supply in Dalian

3.2 大连生态系统服务需求空间特征分析

大连市生态系统服务需求具有显著的空间异质性(图 3),由于人口密度、土地利用综合强度以及地均 GDP 的空间分布均呈现出高值向主城区集中的趋势,使得生态系统服务需求向主城区集中,大连市区最为明显,高达 65848.4。从具体指标来看,人口密度和经济密度的空间分布相似,呈现南高北低、内陆向沿海倾斜的空间格局,北部地广人稀,受山地地形等影响,经济发展较低,对生态系统服务需求较低;南部是大连市经济中心,建设面积广阔,人类干扰活动程度较高,对生态系统服务需求高;东西近海区域水产养殖业发达,陆地稀

疏,多为渔民居住,人口稀疏,生态系统服务需求低。土地需求方面,研究区内林地、水体、湿地的土地利用综合强度最低,集中分布在大连北部,而中部平原地区土地利用强度较高,其中,建设用地最高、耕地次之,分布广泛。

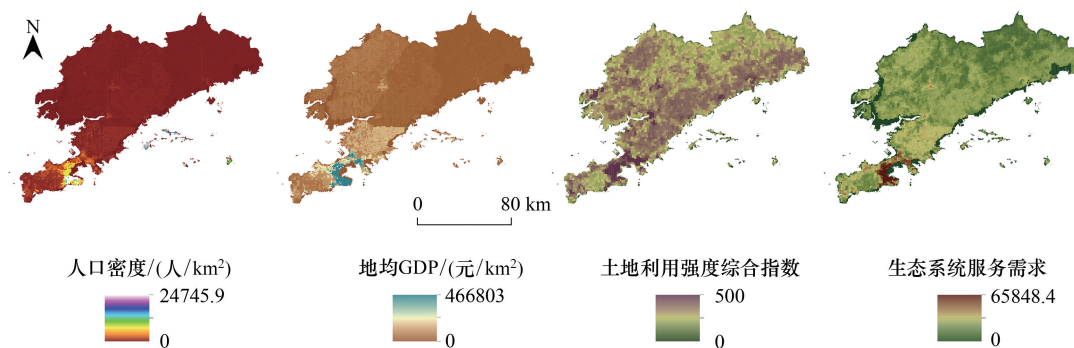


图3 大连市生态系统服务需求

Fig.3 Demand for ecosystem services in Dalian

3.3 大连生态系统服务供需空间耦合协调和匹配分析

2015年大连市生态系统服务供需耦合协调度取值范围为0—0.70,平均值为0.38,表现为轻度失调。从空间分布来看,大连市生态系统服务供需耦合协调度的空间差异明显(图4),呈现内陆向沿海倾斜的空间格局。其中,生态系统服务供需严重失调和中度失调的区域集中分布在东西部沿海,共占研究区总面积的17%;表现为轻度失调的区域与建设用地空间分布较为一致,占比20%;濒临失调的区域占比51%,分布广泛;基本协调的区域与耕地(主要为旱地)的空间分布相似,占比12%,主要原因在于耕地一方面受人类干扰程度较高,另一方面具有较强的生态系统服务供给能力(表2)。

2015年大连市生态系统服务供需的象限匹配如图5所示,经统计得到:高供给-低需求区域约占大连市面积的36%,低供给-高需求区域约占40%,二者比重最大,而高供给-高需求和低供给-低需求分别仅占9%和15%,说明生态系统服务供给和需求之间的不匹配现象突出。从空间分异来看,高供给-低需求区域主要分布在研究区东西部沿海和南北山地,是大连重要的生态屏障,区域内森林和水资源丰富,林、渔业发达,生态系统服务供给高。同时,受地形地貌影响,人类干扰活动较小,生态系统服务的需求较低。低供给-高需求区域主要分布内陆地势平坦地区,土地利用类型以耕地和建设用地为主,区域内的人类活动频繁,生态系统服务的需求较高,但由于缺乏生态系统服务能力较高的林地等土地利用类型,使得生态系统服务的供给较低。高供给-高需求和低供给-低需求分布零散,主要处于前两者类型的过渡地带。

3.4 大连生态管理分区与管控

综上分析可知,大连生态系统服务供需状况空间差异明显,为实现区域可持续发展目标,有必要进行分区管理。通过供需耦合协调和匹配关系叠加分析,并结合《大连市城镇体系规划(2018—2035年)》(以下简称《规划》)和大连市经济地理条件,从区域统筹发展与生态管理角度对大连市进行国土生态管理分区,共分为四大区域:生态涵养区、生态农业区、生态一般保护区及生态改良区(图6)。

(1)生态涵养区主要包括研究区南北部山地,是大连主要的生态屏障,区域内自然保护区、森林公园和水库等资源丰富,良好的生态本底使得生态系统服务供给高,是生态系统服务的主供给地,以调节服务和支持服务为主。生态系统服务供需匹配类型以高供给-低需求和高供给-高需求为主,生态系统服务供需耦合协调关系表现为轻度失调至基本协调。因此,该区的管理方向可以为:以保育为主,限制开发。一方面,注重林木的种植和培育,提高森林覆盖率,保护区域内生物多样性,充分发挥生态功能屏障的作用;另一方面,借助其良好的生态优势,适度开发旅游资源等,发展生态文化产业,形成生态本底好经济基础不断提升的新格局。

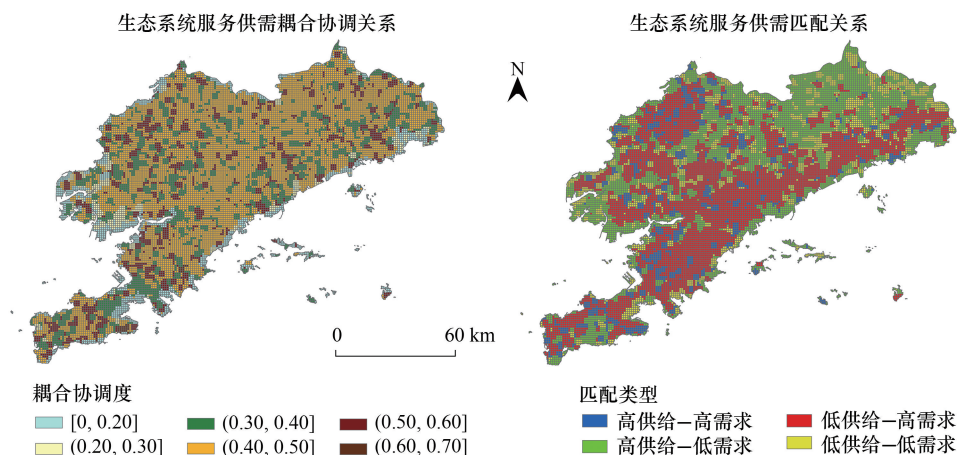


图4 大连市生态系统服务供需关系空间分布

Fig.4 Spatial distribution of ecosystem service supply-demand relations in Dalian

(2)生态农业区主要包括研究区西部和中东部,是大连粮食主产区,土地利用类型以耕地和水产养殖为主。区域内地势平坦,水土条件优良,农牧渔业发达,人类活动干扰强度相对较大,单位面积生态系统服务供给仅次于生态涵养区。生态系统服务供需匹配类型主要为低供给-高需求和高供给-高需求,生态系统服务供需耦合协调关系表现为基本协调。因此,该区要以生态保护和生态建设为主,提高其投入产出效率。一方面,在保证粮食安全的前提下适当退耕还林还草,提升农牧业生产技术,减少药物和肥料的使用,提高农、畜牧等农产品单产,进而提升生态系统服务的供给能力;另一方面,发展生态农业,如:大连中北部借助耕地和林地资源发展有机农产品生态田园,东西沿海借助湿地和海洋资源建设休闲娱乐型海洋牧场等,提升其休闲娱乐服务,提高土地利用产出效益。

(3)生态一般保护区主要分布在黄、渤海沿岸,山、海、岛地貌丰富,区内功能复合、文化多元。生态系统服务供需匹配类型以低供给-高需求为主,生态系统服务供需协调度呈现濒临失调至基本协调状况。因此,区域内生态管理方向可以为:综合保护为主,提高生态溢出效应。一方面,保护生态环境,遵循绿色低碳循环发展的理念;另一方面,促进产业集群发展,创建新的经济增长极。特别是沿海地区,应加强海洋生态环境保护,将海岸线资源优势转为经济优势,促进产业集群发展带动人口集聚。其中,位于渤海沿岸的长兴岛经济技术开发区拥有优良的建港条件,应积极发展临港物流业;位于黄海沿岸的花园口经济区是国家新材料高技术产业基地,应积极发展生物、新能源等战略性新兴产业。

(4)生态改良区主要分布在各区县中心城区,区域内植被覆盖度较低,人口密度大,人类活动频繁,是主要的产业集群地。生态系统服务供需匹配类型以低供给-高需求为主,生态系统服务供需协调度呈现轻度失调至中度失调状况,人地矛盾和生态问题突出。因此,区域内发展应以生态改良为主,综合改善生态系统服务水平。一方面,重视土地整治,优化产业结构,发展绿色经济;另一方面,大连市区是多种产业的中心,可以借助外部生态一般保护区的优势,适当中心北移,缓解人地矛盾问题。

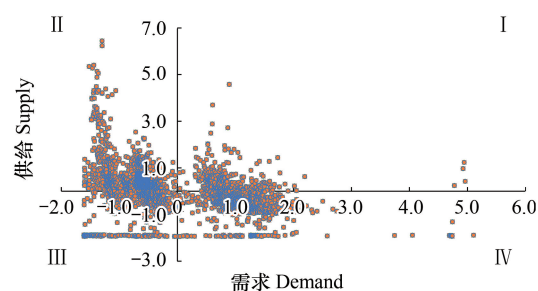


图5 大连市生态系统服务供需象限图

Fig. 5 Quadrant map of ecosystem services supply-demand in Dalian

4 结论与讨论

4.1 讨论

2015 年大连市生态系统服务供需空间分异结果显示,生态系统服务供需呈现北部林地和东西部沿海生态系统服务供给高、需求低,中南内陆城镇区生态系统服务供给低、需求高的空间格局,原因之一在于资源禀赋的差异。据统计,2015 年大连市林地面积 4331 km²,占全市的 32%,但 1/2 以上的林地资源集中在北部山地,而北部山地平均人口密度不足 300 人/km²。大连市建设用地面积 2063 km²,占全市的 15%,其中 1/5 集中分布在大连市区北部和金州区南部,该区人口密度超过 2000 人/km²,最高达 24746 人/km²,地均 GDP 高达 1.2—46.7 万元/km²。这表明大连市生态系统服务供需存在严重的空间不平衡。其次,经济空间布局是导致生

态系统服务供需空间不平衡原因之一。《规划》指出要建设“一核两区七组团多节点”的城乡空间结构,结合上述分析可知,该地生态系统服务供给普遍较低。此外,大连市临港产业分布与此结构类似,集中分布在黄渤海沿岸,产业以装备制造业等第二产业为主,能耗大、污染大,产业结构可能对生态系统服务供需空间不平衡有一定影响,未来尚需探究产业结构是否及如何影响了生态系统服务供需关系。

生态系统服务供需匹配表明二者在量上一致,生态系统服务供需协调发展表明二者在质上和谐一致,城市发展需要维持现状或向高质量方向调整;反之,当生态系统服务供需出现不匹配或失调的情况下,城市的生态、生产和生活空间承受较大的压力或具有富余发展空间,城市需要对三生空间有效利用与管控,针对不同的供需模式采取对应的规划策略,其中生态管理分区是基于生态系统服务供需双重影响下合理规划的重要方法。研究发现各区县中心城区和东西近海普遍存在生态系统服务供需的不匹配和不协调。由于空间局限,中心城区难以直接进行改变,这就需要适中心外移,创造新的增长极,缓解中心城区生态系统服务赤字压力。东西近海用地类型以水产养殖及盐田为主,具有较强的食物供给能力,呈现生态系统服务盈余状态,沿海生态系统服务对分区产生了较大影响。因此,按照陆地国土空间与海洋国土空间相统一的要求,需要提高沿海与内陆的连通性,增强城市外围生态系统的供应向中心辐射能力,既满足城市生态系统服务的需求,又带动经济发展。《规划》指出要通过建设都市新区有效疏解都市极核发展的压力,进一步验证了生态管理分区的合理性。总体来看,本研究可为大连市生态保护规划、土地利用规划和城市发展规划提供有力支撑,有利于生态安全和人类福祉协调发展,也是将生态系统服务供需概念融入实践应用的有益探索。尽管研究采用可以反映区域内部差异的网格尺度,但是生态系统服务存在尺度效应,流域、行政单元边界可能存在供需差异,其与网格边界不匹配,因此多尺度下的生态系统服务供需关系差异还需进一步深入探讨,使生态管理分区更加系统和科学。

4.2 结论

(1) 2015 年大连市生态系统服务供给高达 469.6757 亿元,其中固碳释氧服务的供给最高,美学景观次之,分别占总供给 32%和 21%,区域内林地、耕地等绿色基础设施分布广泛,二者生态系统服务供给能力最强,占总供给 76%。整体上,大连市生态系统服务供给呈现东西、南北 U 型空间格局。

(2) 大连市生态系统服务需求具有显著的空间异质性,由于区域内经济需求、人口需求和土地需求的空間分布均呈现出高值向主城区集中的趋势,使得大连市整体生态系统服务需求向主城区集中。

(3) 生态系统服务供需不匹配特征显著,匹配类型以高供给-低需求和低供给-高需求为主,生态系统服务

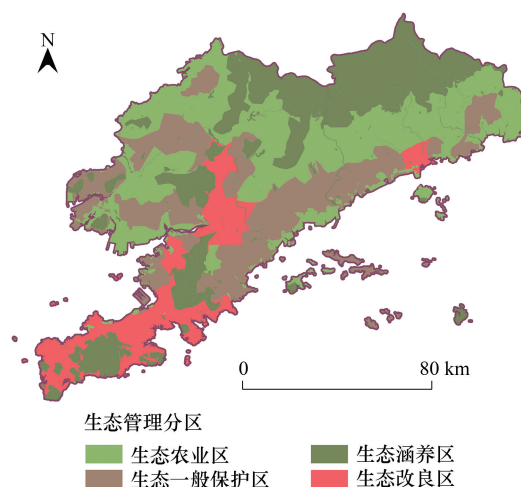


图 6 大连市生态管理分区

Fig.6 Zoning of ecological management in Dalian

供需耦合协调度平均值为 0.38, 表现为轻度失调。

(4) 生态涵养区要以保护为主培育为辅, 重点保护; 生态农业区以生态保护和生态建设为主, 提高其投入产出效率; 生态改良区以生态改良为主, 综合改善生态系统服务水平; 生态一般保护区以综合保护为主, 提高生态溢出效应。生态管理分区可为大连市国土空间规划提供有力支撑, 有助于生态可持续发展及人类福祉提高。

参考文献 (References):

- [1] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-Being. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [2] Zhai T L, Wang J, Jin Z F, Qi Y, Fang Y, Liu J J. Did improvements of ecosystem services supply-demand imbalance change environmental spatial injustices? *Ecological Indicators*, 2020, 111: 106068.
- [3] 翟天林, 王静, 金志丰, 祁元. 长江经济带生态系统服务供需格局变化与关联性分析. *生态学报*, 2019, 39(15): 5414-5424.
- [4] 管青春, 郝晋珉, 许月卿, 任国平, 康蕾. 基于生态系统服务供需关系的农业生态管理分区. *资源科学*, 2019, 41(7): 1359-1373.
- [5] Burkhard B, Kandziora M, Hou Y, Müller F. Ecosystem service potentials, flows and demands-Concepts for spatial Localisation, indication and quantification. *Landscape Online*, 2014, 34: 1-32.
- [6] 李双成, 王珏, 朱文博, 张津, 刘娅, 高阳, 王阳, 李琰. 基于空间与区域视角的生态系统服务地理学框架. *地理学报*, 2014, 69(11): 1628-1639.
- [7] 朱金峰, 周艺, 王世新, 王丽涛, 刘文亮, 李海涛, 梅建军. 白洋淀湿地生态功能评价及分区. *生态学报*, 2020, 40(2): 459-472.
- [8] 王蓓, 赵军, 仲俊涛. 2005—2015 年石羊河流域生态系统服务时空分异. *干旱区研究*, 2019, 36(2): 474-485.
- [9] 李淑娟, 高琳. 胶州湾北岸滨海地区 4 个时期生态系统服务价值和生态功能区划分研究. *湿地科学*, 2020, 18(2): 129-140.
- [10] 王宏亮, 高艺宁, 王振宇, 沙威, 吴健生. 基于生态系统服务的城市生态管理分区——以深圳市为例. *生态学报*, 2020, 40(23): 8504-8515.
- [11] 谢丽霞, 白永平, 车磊, 乔富伟, 孙帅帅, 杨雪菡. 基于价值—风险的黄河上游生态功能区生态分区建设. *自然资源学报*, 2021, 36(1): 196-207.
- [12] 李慧蕾, 彭建, 胡熠娜, 武文欢. 基于生态系统服务簇的内蒙古自治区生态功能分区. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2657-2666.
- [13] Liu Y X, Li T, Zhao W W, Wang S, Fu B J. Landscape functional zoning at a county level based on ecosystem services bundle: methods comparison and management indication. *Journal of Environmental Management*, 2019, 249: 109315.
- [14] Fisher B, Turner R K, Morling P. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, 2009, 68(3): 643-653.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Castro A J, Verburg P H, Martín-López B, García-Llorente M, Cabello J, Vaughn C C, López E. Ecosystem service trade-offs from supply to social demand: a landscape-scale spatial analysis. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 132: 102-110.
- [18] Vigl L E, Depellegrin D, Pereira P, de Groot R, Tappeiner U. Mapping the ecosystem service delivery chain: capacity, flow, and demand pertaining to aesthetic experiences in mountain landscapes. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 422-436.
- [19] 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.
- [20] Goldenberg R, Kalantari Z, Cvetkovic V, Mörtberg U, Deal B, Destouni G. Distinction, quantification and mapping of potential and realized supply-demand of flow-dependent ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 2017, 593-594: 599-609.
- [21] 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.
- [22] 陈骏宇, 王慧敏, 刘钢, 白杨. “水-能-粮”视角下杭嘉湖区域生态系统服务供需测度及政策研究. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(3): 542-553.
- [23] Cheng X, Long R Y, Chen H, Li Q W. Coupling coordination degree and spatial dynamic evolution of a regional green competitiveness system-A case study from China. *Ecological Indicators*, 2019, 104: 489-500.
- [24] 刘春芳, 王韦婷, 刘立程, 李鹏杰. 西北地区县域生态系统服务的供需匹配——以甘肃古浪县为例. *自然资源学报*, 2020, 35(9): 2177-2190.
- [25] 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.
- [26] 马程, 王晓玥, 张雅昕, 李双成. 北京市生态涵养区生态系统服务供给与流动的能值分析. *地理学报*, 2017, 72(6): 974-985.

- [27] 吴晓,周忠学. 城市绿色基础设施生态系统服务供给与需求的空间关系——以西安市为例. 生态学报,2019,39(24): 9211-9221.
- [28] Morri E, Pruscini F, Scolozzi R, Santolini R. A forest ecosystem services evaluation at the river basin scale: supply and demand between coastal areas and upstream lands (Italy). *Ecological Indicators*, 2014, 37: 210-219.
- [29] 马琳,刘浩,彭建,吴健生. 生态系统服务供给和需求研究进展. 地理学报,2017,72(7): 1277-1289.
- [30] 姜忆湄,李加林,龚虹波,叶梦姚,冯佰香,何改丽,黄日鹏. 围填海影响下海岸带生态服务价值损益评估——以宁波杭州湾新区为例. 经济地理,2017,37(11): 181-190.
- [31] 张伟. 城市绿色基础设施的生态系统服务评估和规划设计应用研究[D]. 北京:北京林业大学,2017.
- [32] 段锦,康慕谊,江源. 东江流域生态系统服务价值变化研究. 自然资源学报,2012,27(1): 90-103.
- [33] 韩增林,赵玉青,闫晓露,钟敬秋. 生态系统生产总值与区域经济耦合协调机制及协同发展——以大连市为例. 经济地理,2020,40(10): 1-10.
- [34] 韩增林,赵文祯,闫晓露,钟敬秋,孟琦琦. 基于生态系统服务价值损益的生态安全格局演变分析——以辽宁沿海瓦房店市为例. 生态学报,2019,39(22): 8370-8382.
- [35] 谢高地,张彩霞,张昌顺,肖玉,鲁春霞. 中国生态系统服务的价值. 资源科学,2015,37(9): 1740-1746.
- [36] 吴健生,岳新欣,秦维. 基于生态系统服务价值重构的生态安全格局构建——以重庆两江新区为例. 地理研究,2017,36(3): 429-440.
- [37] 韩增林,孟琦琦,闫晓露,赵文祯. 近30年辽东湾北部区土地利用强度与生态系统服务价值的时空关系. 生态学报,2020,40(8): 2555-2566.
- [38] Villamagna A M, Angermeier P L, Bennett E M. Capacity, pressure, demand, and flow: a conceptual framework for analyzing ecosystem service provision and delivery. *Ecological Complexity*, 2013, 15: 114-121.
- [39] Castillo-Eguskiza N, Martín-López B, Onaindia M. A comprehensive assessment of ecosystem services: integrating supply, demand and interest in the Urdaibai Biosphere Reserve. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 1176-1189.
- [40] 彭建,杨旸,谢盼,刘焱序. 基于生态系统服务供需的广东省绿地生态网络建设分区. 生态学报,2017,37(13): 4562-4572.
- [41] 黄智洵,王飞飞,曹文志. 耦合生态系统服务供求关系的生态安全格局动态分析——以闽三角城市群为例. 生态学报,2018,38(12): 4327-4340.
- [42] Li X Z, Sun Y G, Mander Ü, He Y L. Effects of land use intensity on soil nutrient distribution after reclamation in an estuary landscape. *Landscape Ecology*, 2013, 28(4): 699-707.
- [43] 李雪松,龙湘雪,齐晓旭. 长江经济带城市经济-社会-环境耦合协调发展的动态演化与分析. 长江流域资源与环境,2019,28(3): 505-516.
- [44] 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.