

哈尔滨市生态系统服务供需匹配关系研究

李婷婷¹, 李朦朦¹, 吴远翔^{1*}, 赵晶²

(1. 哈尔滨工业大学建筑与设计学院, 自然资源部寒地国土空间规划与生态保护修复重点实验室, 哈尔滨 150006; 2. 黑龙江开放大学, 哈尔滨 150006)

摘要: 本文从生态系统服务供需与“联合国可持续发展目标”(SDGs)耦合的角度分析,以期厘清区域生态系统服务供需匹配关系并优化基础资源配置。以哈尔滨市为例,结合 InVEST 模型,基于 SDG2、6、12 探讨粮食生产、产水、固碳服务的供需匹配模式和相关性。结果表明:(1)在供需方面三种服务呈两两协同的关系,且在人口密度大的城区供不应求,这与其周边地区供需匹配呈较大差异;(2)由于这三种服务导致供需赤字,加剧了哈尔滨区域生态系统服务供需矛盾程度,对传统供需评价结果起修正作用。研究结果可为供需匹配提供科学依据,有助于 SDGs 的推进与落实。

关键词: 可持续发展;生态系统服务;供需匹配;哈尔滨

中图分类号: TU985.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-2736(2024)04-0018-8

0 引言

生态系统不仅为人类活动带来丰富的益处,其直接和间接的服务更成为了人类福祉的基石^[1]。联合国提出的《改变我们的世界:2030年可持续发展议程》的可持续发展目标(Sustainable Development Goals, SDGs)是为了探讨如何让地球能够可持续发展^[2]。粮食、水、能源等关键资源不仅是人类社会持续发展的物质基础,更是生态系统服务不可或缺的部分^[3]。SDGs 包括 17 项可持续发展目标^[4],具体有 169 个指标,这是一个关注社会、经济和环境共同发展的前瞻性测度框架^[5-7]。其中与粮食、水、能源有关的目标是第 2 项、第 6 项、第 12 项,分别为消除饥饿、清洁饮水和卫生设施、永续供求。包含的具体指标有粮食生产、粮食供给、城市供水能力、用水量、碳排放量等。为了在中国更好地推进和落实 SDGs,借鉴这一指标框架,结合生态系统服务的实际情况,构建一个针对城市可持续发展水平的指标体系,进而为区域可持续发展提供科学的生态管理依据和策略。

自 20 世纪 90 年代起,生态系统服务供需研

究主要聚焦于概念界定和理论架构的研究^[8-9]。进入 21 世纪,该领域的研究重心转向生态系统服务供需定量化分析^[10-12]。当前,国内外学者基于遥感、统计等多源数据,运用模型构建、土地利用评估、数据空间可视化表达、价值评估、生态模拟及专家判断等方法,量化分析生态系统服务的供需分布及其匹配情况^[13-17]。从研究尺度上来看,供需研究主要有省域、市域、县域、流域、格网 5 种不同空间尺度,其中县域尺度在东北地区的生态管理中是最佳选择^[18]。尽管现有研究提供了丰富参考,但仍有不足,对生态系统服务供需与 SDGs 的关联性分析较少,且缺乏对中小城市区域及 SDGs 部分特定目标的本土化深入研究^[19]。

哈尔滨市地处东北地区,是我国的老工业基地、粮食“压舱石”,并拥有着丰富的生态资源。但由于产业结构与资源分布存在空间错位现象,部分区域生态系统服务供需矛盾突出,因此迫切需要明确哈尔滨的生态系统服务供需匹配状况^[20]。鉴于此,本研究创新性地提出基于 SDG2、6、12 的供需匹配框架,深入探究区域粮食生产、产水及固碳服务的供需情况,进一步分析

表 1 2000 年、2010 年、2020 年哈尔滨土地利用面积变化 (hm²)

年份	土地利用类型					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2000	2367584.81	2353650.43	103312.49	328076.89	158548.82	371.97
2010	2384206.42	2305499.63	147083.18	291245.08	180434.99	3140.70
2020	2352579.00	2312078.42	116275.15	351382.11	178363.73	820.16

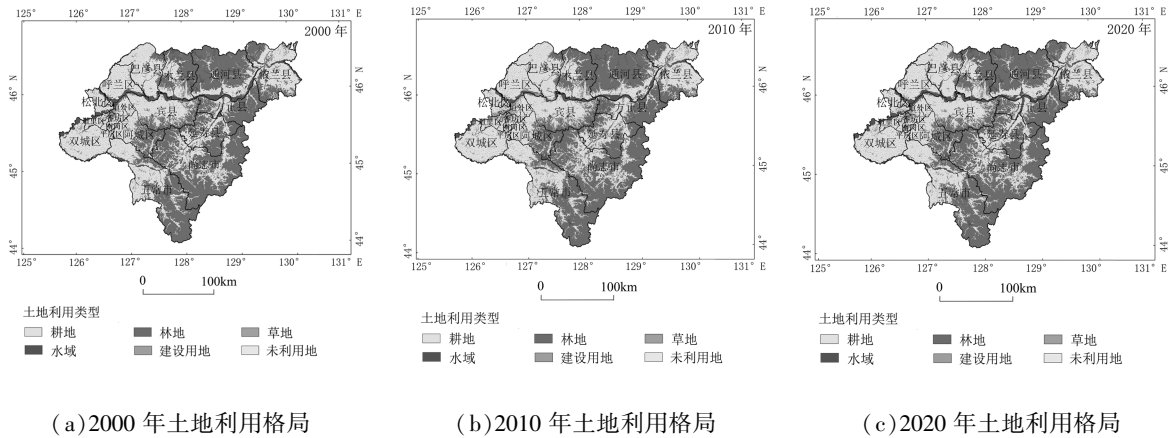


图 1 2000 年、2010 年、2020 年哈尔滨土地利用格局

了这些服务供需量的变化趋势,评价各类服务空间分布的匹配度、相关性,为哈尔滨区域优化资源配置提供借鉴参考。

1 材料与研究方法

1.1 研究区概况

黑龙江省省会哈尔滨位于中国东北部,地处东北亚中心区域(125°42' - 130°10'E, 44°04' - 46°40'N)。现辖 9 个市辖区、7 个县、2 个县级市,总面积约为 53 068km²。哈尔滨西南地势较为平坦,东部多山地丘陵。在研究区内,土地利用类型以林地和耕地为主导。其中,林地主要集中分布于东部地带,而耕地则广泛分布在中心城区的周边区域,形成了独特的土地利用格局(图 1)。2000 年至 2020 年间,建设用地在空间上的变化最为明显(表 1)。研究区中林地等生态用地面积处于波动状态,耕地面积不断下降,建设用地面积不断增长。

1.2 数据来源及处理

本文使用的基础数据主要包括(表 2)。

1.3 基于 SDGs 的供需匹配测度框架

随着社会资源与城市居民需求的空间匹配差异变大,阻碍了资源分配合理性的同时,还进一步加剧了供需之间的紧张关系。本文选取的 SDG2、6、12 是国际上关于可持续发展的权威指标,涉及消除饥饿、清洁饮水和卫生设施、可持续消费和生产模式三个维度,能够全面客观地反映居民的社会需求^[21]。针对哈尔滨的城市发展特征,本文选取的涵盖三个维度的六个具体指标(表 3),以构建一套完善的城市可持续发展水平评价指标体系,进而全面考量并平衡城市区域发展中居民的需求。

1.4 生态系统服务供需评估

1.4.1 粮食服务

(1) 粮食生产量。本文将每个栅格 NDVI 值和耕地总 NDVI 值的比值作为分配粮食产量的系数,把粮食产量分配到栅格单元中。公式如下:

$$FS = \left(\frac{NDVI(x)}{NDVI_{sum}} \right) \times G_{sum} \quad (1)$$

表 2 本文使用的基础数据来源

序号	数据名称	空间分辨率	数据来源
1	行政边界		
2	土地覆盖数据	30m	资源环境科学数据平台
3	数字高程模型 DEM	30m	(http://www.resdc.cn)
4	归一化植被覆盖指数数据 NDVI	1km	
5	人口密度数据	1km	WorldPop(http://www.worldpop.org)
6	哈尔滨年粮食产量数据、 粮食需求量数据		哈尔滨市统计年鉴
7	碳排放数据		中国碳核算数据库 CEADs(http://www.ceads.net/)
8	降雨量	1km	国家生态科学数据中心
9	蒸散发量	1km	(http://www.nesdc.org.cn)
10	根系深度、土壤质地和有机碳含量	30"	中国土壤数据库 (http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data)
11	需水量		哈尔滨市水资源公报

式中, FS 表示粮食服务供给量 (t/hm^2); $NDVI(x)$ 为栅格单位 x 的植被覆盖指数; $NDVI_{sum}$ 为耕地的植被覆盖指数之和; G_{sum} 为粮食总产量 (t); 每个栅格单元大小为 $3000m \times 3000m$, 面积为 $900hm^2$ 。

(2) 粮食需求量。粮食需求量通过人均粮食消费量和人口密度的乘积来反映。公式如下:

$$FD = D_{food} \times \rho_{pop} \quad (2)$$

式中, FD 表示粮食服务需求量 (t/hm^2); D_{food} 表示人均粮食消费量 ($t/人$); ρ_{food} 表示人口密度 ($人/hm^2$)。

1.4.2 产水服务

(1) 产水量。本文利用 *InVEST* 模型, 计算得到每个栅格单元的年产水量。公式如下:

$$WS(x_i) = \frac{(1 - AET(x_i))}{P(x_i)} \times P(x_i) \quad (3)$$

式中, $WS(x_i)$ 表示土地利用类型 i 的栅格 x 的年产水量 (mm); $P(x_i)$ 表示栅格 x 的降雨量

(mm); $AET(x_i)$ 表示土地利用类型 i 的栅格 x 的实际年均蒸散发量 (mm)。

(2) 需水量。借助人口密度数据将用水量统计数据赋值于栅格单元中。公式如下:

$$WD = D_{water} \times \rho_{pop} \quad (4)$$

式中, WD 为年需水量 (m^3/hm^2); D_{water} 为人均用水量 ($m^3/人$); ρ_{pop} 表示人口密度 ($人/hm^2$)。

1.4.3 固碳服务

(1) 碳储存量。本文基于 *InVEST* 模型对碳储存量进行测算, 碳储存量为地上生物碳量、地下生物碳量、土壤有机碳量、死亡有机质碳量之和。公式如下:

$$CS_{tot} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead} \quad (5)$$

式中, CS_{tot} 表示碳储存量 (t/hm^2); C_{above} 、 C_{below} 、 C_{soil} 和 C_{dead} 分别表示地上生物碳量、地下生物碳量、土壤有机碳量和死亡有机质碳量 (t/hm^2)。

(2) 固碳需求量。人均碳排放量与人口密

表 3 城市可持续发展水平的评价指标

生态服务指标	对应的 SDGs 目标	SDGs 的具体指标
粮食生产服务	SDG2. 消除饥饿、实现粮食安全、改善营养并促进可持续农业	粮食生产量、粮食需求量
产水服务	SDG6. 清洁饮水和卫生设施	产水量、需水量
固碳服务	SDG12. (永续供求) 确保可持续消费和产模式	碳储存量、固碳需求量

度相乘可得到固碳需求量。公式如下:

$$CD = D_{\text{carbon}} \times \rho_{\text{pop}} \quad (6)$$

式中, CD 为固碳服务需求量 (t/hm^2); D_{carbon} 为人均碳排放量 ($t/人$); ρ_{pop} 为人口密度 ($人/hm^2$)。

1.4.4 生态系统服务供需匹配

本文应用生态系统服务供需指数 (SDI) 表征研究区生态系统服务供需匹配情况, 为生态管理优化提供科学依据^[22]。公式如下:

$$SDI_i = \frac{ESS_i - ESD_i}{ESS_i + ESD_i} \quad (7)$$

式中, SDI_i 为地区 i 的生态系统服务供需指数; ESS_i 和 ESD_i 分别表示生态系统服务供给量

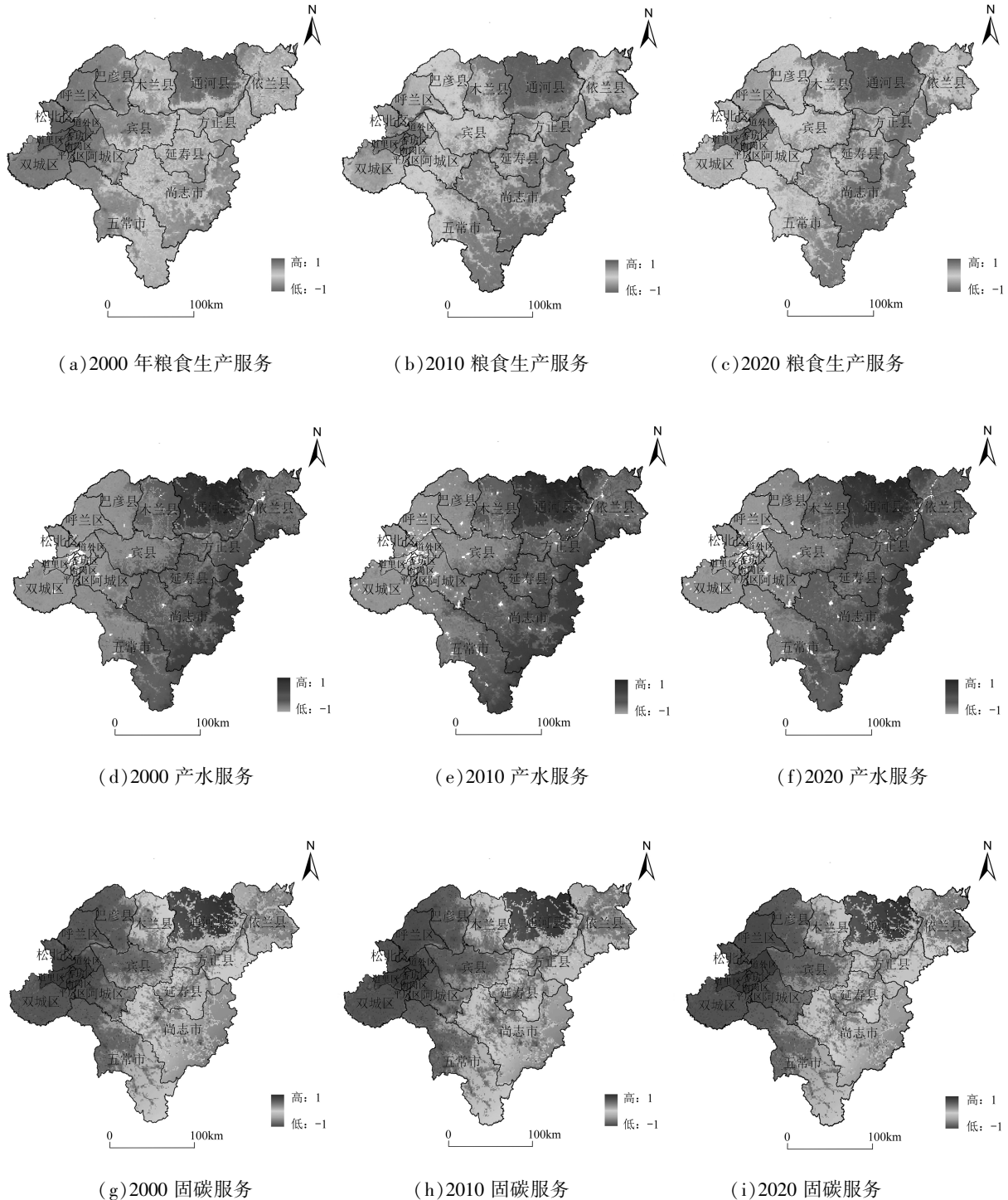


图2 2000年、2010年、2020年哈尔滨生态系统服务供需指数时空分布

表 4 2000 年、2010 年、2020 年哈尔滨各区县生态系统服务供需指数

年份	2000			2010			2020				
	生态系统服务类型	粮食生产服务	产水服务	固碳服务	粮食生产服务	产水服务	固碳服务	粮食生产服务	产水服务	固碳服务	
区	道里区	-0.958	-0.997	-0.997	-0.935	-0.995	-0.998	-0.856	-0.992	-0.999	
	道外区	-0.827	-0.984	-0.989	-0.699	-0.984	-0.995	-0.869	-0.992	-0.999	
	南岗区	-0.979	-0.998	-0.999	-0.918	-0.996	-0.999	-0.948	-0.997	-1.000	
	香坊区	-0.957	-0.995	-0.997	-0.928	-0.997	-0.999	-0.744	-0.986	-0.998	
	松北区	-0.840	-0.987	-0.989	-0.721	-0.984	-0.993	-0.391	-0.966	-0.994	
	呼兰区	-0.750	-0.982	-0.983	-0.615	-0.983	-0.993	-0.564	-0.972	-0.995	
	平房区	-0.971	-0.997	-0.998	-0.861	-0.995	-0.998	-0.939	-0.997	-1.000	
	阿城区	-0.663	-0.965	-0.975	-0.258	-0.959	-0.984	-0.239	-0.950	-0.991	
	双城区	-0.771	-0.981	-0.984	-0.567	-0.976	-0.991	-0.367	-0.968	-0.994	
	尚志市	-0.142	-0.860	-0.913	0.327	-0.852	-0.949	0.367	-0.810	-0.964	
	县	五常市	-0.443	-0.926	-0.951	0.117	-0.902	-0.970	0.079	-0.895	-0.980
		巴彦县	-0.667	-0.971	-0.977	-0.196	-0.966	-0.987	-0.193	-0.945	-0.990
		宾县	-0.559	-0.952	-0.965	-0.124	-0.952	-0.981	-0.121	-0.923	-0.986
		方正县	-0.209	-0.888	-0.926	0.216	-0.876	-0.953	0.333	-0.819	-0.967
		木兰县	-0.343	-0.915	-0.935	0.191	-0.912	-0.964	0.122	-0.867	-0.975
		通河县	0.171	-0.791	-0.858	0.542	-0.782	-0.915	0.604	-0.687	-0.940
延寿县		-0.230	-0.889	-0.928	0.240	-0.888	-0.959	0.282	-0.848	-0.971	
依兰县	-0.315	-0.902	-0.936	0.122	-0.895	-0.962	0.136	-0.850	-0.975		

和需求量。 $SDI_i > 0$ 表明处于盈余状态, $SDI_i = 0$ 表明处于平衡状态, $SDI_i < 0$ 表示处于赤字状态。

2 结果与分析

2.1 供需匹配

2000 - 2020 年哈尔滨市区县粮食生产服务供需指数总体呈上升趋势, 其中道里区、道外区、南岗区、香坊区、松北区、呼兰区、平房区、双城区、巴彦县、宾县供需指数呈赤字状态, 2000 - 2010 年间尚志市、方正县、延寿县、依兰县、五常市、木兰县供需指数呈赤字状态, 2010 - 2020 年间呈盈余状态。通河县从 2000 - 2020 年间供需指数呈盈余状态(表 4)。从空间分布来看, 周边区县农田面积大且人口少, 其粮食生产服务大多供过于求; 中心城区由于农田面积小、人口多, 普遍对粮食需求大(图 2a、b、c)。

2000 - 2020 年哈尔滨市区县产水服务供需指数有一定的差异(表 4)。南岗区、平房区、延寿县供需指数变化趋势处于不变状态, 道外区供需指数有下降趋势, 其余区县供需指数均为上升趋势。总体区县供需指数呈赤字状态(图 2d、e、f), 供需分布与建设用地不匹配, 且赤字区趋势缩小, 说明区域的水安全面临极大的问题。

2000 - 2020 年哈尔滨市区县固碳服务供需指数总体呈下降趋势, 并处于赤字状态(表 4)。其中通河县赤字程度最低, 西部中心城区区域赤字最为严重, 且有向周边市县蔓延的趋势。从空间分布来看, 少部分森林和农田处于供需平衡状态(图 2g、h、i), 农田与森林的固碳能力强, 归因于其生态特性和区县较低的人口密度, 人口密度低可以减少能源消耗和排放, 使供需相对均衡, 而中心城区的情况恰好与之相反。

表 5 生态系统服务供给相关性系数

年份	产水 - 固碳	固碳 - 粮食生产	产水 - 粮食生产
2000	0.823**	0.947**	0.822**
2010	0.814**	0.787**	0.751**
2020	0.757**	0.732**	0.771**

** 表示在 0.01 水平上显著相关。

2.2 相关性分析

利用 SPSS 软件分析粮食生产、产水、固碳服务间的两两相关性(表 5)。供给方面,系数显著超过 0.01,验证了服务间的显著相关性。产水与粮食生产为正相关关系,降水量是产水服务的主要因素,影响着粮食生产状况。固碳 - 粮食生产与产水 - 固碳均为正相关关系,为协同关系。需求方面,相关性系数近 1,说明三种服务均呈正相关,协同作用显著。

3 结语

本文将 SDG2、SDG6、SDG12 与生态系统服务供需有机结合,量化了哈尔滨市 2000 年、2010 年、2020 年粮食生产、产水和固碳服务供需关系,分析匹配程度和三种服务之间的两两权衡协同关系。研究发现:

(1) 哈尔滨产水服务和固碳服务供需匹配度总体呈下降趋势,部分市县粮食生产服务呈上升趋势。除了 2010 - 2020 年尚志市、五常市、方正县、木兰县、延寿县、依兰县粮食生产服务呈供大于求外,空间分布属于盈余区,其余市县在研究期内固碳、产水、粮食生产服务均呈下降趋势,空间分布属于赤字区,且有向周边扩散的趋势。总的来说,这三种服务之间呈两两协同关系,且在人口密度大的城区供不应求,与其周边地区供需匹配形成较大差异。

(2) 以 SDG2、SDG6、SDG12 为视角的粮食生产、产水、固碳三种服务对生态系统服务供需指数有直接影响,进而对传统供需评价结果起到了修正作用。

未来可在 SDG2 视角下,基于供需测度结

果,建议处于盈余的地区提高粮食生产力,鼓励企业创新,增加其农业的附加值;建议由赤字转为盈余的地区完善生态补偿,推动粮食高质量发展工作;一直处于赤字的城区需要严格遵守耕地红线,保护生态安全。结合 SDG6,建议加快节水型社会建设,优化雨水利用,防洪涝并补充水资源,确保城市水资源可持续利用。结合 SDG12,提出严格划定生态保护红线,增加森林面积,强化城市绿地与生态保护区建设,提升生态系统固碳能力的要求。本文在理论分析框架与评价指标方面有所创新,但在实证数据的搜集与获取上,尚需进一步提升研究的完整性与准确性。

参考文献(References):

- [1] Yin D Y, Yu H C, Shi Y Y, et al. Matching supply and demand for ecosystem services in the Yellow River Basin, China: a perspective of the water - energy - food nexus[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 384: 135469.
- [2] Desa U N. Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development[R], 2016
- [3] Chen H G, Zhang Y H P. New biorefineries and sustainable agriculture: increased food, biofuels, and ecosystem security[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 47: 117 - 132.
- [4] 关婷, 薛澜. 世界各国是如何执行全球可持续发展目标(SDGs)的?[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(01): 11 - 20.
- [5] Simon D, Arfvidsson H, Anand G, et al. Developing and testing the urban sustainable development goal's targets and indicators: A five - city study[J]. Environment and Urbanization, 2016, 28(01): 49 - 63.
- [6] Acuto M, Parnell S. Leave no city behind[J]. American Association for the Advancement of Science,

- 2016, 352(6288): 873 – 878.
- [7] 陈佑淋, 余珮珩, 白少云, 等. 面向 SDGs 的村镇可持续发展质量评估: 以杞麓湖流域为例[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(06): 152 – 162.
- [8] Rees W E. Revisiting carrying capacity: area based indicators of sustainability[J]. *Population and Environment*, 1996, 17(03): 195 – 215.
- [9] Daily G C. *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems* [M]. Washington, DC: Island Press, 1997.
- [10] Larondelle N, Lauf S. Balancing demand and supply of multiple urban ecosystem services on different spatial scales[J]. *Ecosystem Services*, 2016, 22: 18 – 31.
- [11] 严岩, 朱捷缘, 吴钢, 等. 生态系统服务需求、供给和消费研究进展[J]. 生态学报, 2017, 37(08): 2489 – 2496.
- [12] 陈俊辰, 贺淑钰, 薛晶, 等. 多尺度生态系统服务的权衡关系及其对景观配置响应: 以湖北省为例[J]. 生态学报, 2023, 43(12): 4835 – 4846.
- [13] Kroll F, Müller F, Haase D, et al. Rural? urban gradient analysis of ecosystem services supply and demand dynamics[J]. *Land Use Policy*, 2012, 29(03): 521 – 535.
- [14] Palomo I, Martín – López B, Potschin M, et al. National Parks, buffer zones and surrounding lands: mapping ecosystem service flows [J]. *Ecosystem Services*, 2013, 4: 104 – 116.
- [15] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展[J]. 地理科学进展, 2014, 33(04): 441 – 446.
- [16] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值[J]. 资源科学. 2015, 37 (09): 1740 – 1746.
- [17] 彭建, 杨旸, 谢盼, 等. 基于生态系统服务供需的广东省绿地生态网络建设分区[J]. 生态学报, 2017, 37(13): 4562 – 4572.
- [18] 安志英, 孙才志, 郝帅. 我国东北生态系统服务的供需匹配关系: 基于水 – 能源 – 粮食纽带视角[J]. 生态学报, 2024, 44(10): 4170 – 4186.
- [19] 陈佑淋, 余珮珩, 李志刚, 等. 基于 SDG11 的城市绿地环境公平测度: 以武汉市中心城区为例[J]. 地理与地理信息科学, 2021, 37 (04): 81 – 89.
- [20] Xiang H X, Zhang J, Mao D H, et al. Identifying spatial similarities and mismatches between supply and demand of ecosystem services for sustainable Northeast China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 134: 108501.
- [21] Griggs D J, Nilsson M, Stevance A, et al. *A Guide to SDG Interactions: From Science to Implementation* [M]. International Council for Science, 2017.
- [22] 刘立程, 刘春芳, 王川, 等. 黄土丘陵区生态系统服务供需匹配研究: 以兰州市为例[J]. 地理学报, 2019, 74 (09): 1921 – 1937.

作者简介:

第一作者: 李婷婷, 1994 年生, 女, 黑龙江拜泉人, 博士, 哈尔滨工业大学建筑与设计学院, 自然资源部寒地国土空间规划与生态保护修复重点实验室, 主要研究方向为风景园林学。Email: 534420294@qq.com;

通讯作者: 吴远翔, 1971 年生, 男, 江苏通州人, 博士, 哈尔滨工业大学建筑与设计学院, 自然资源部寒地国土空间规划与生态保护修复重点实验室, 副教授, 主要研究方向为风景园林学。Email: 745417816@qq.com

Research on the Supply – Demand Matching Relationship of Ecosystem Services in Harbin

LI Tingting¹, LI Mengmeng¹, WU Yuanxiang^{1*}, ZHAO Jing²

(1. School of Architecture and Design, Harbin Institute of Technology; Key Laboratory of National Territory Spatial Planning and Ecological Restoration in Cold Regions, Ministry of Natural Resources, Harbin 150006, China;

2. Heilongjiang Open University, Harbin 150006, China)

Abstract: This research analyzes the coupling between the supply and demand of ecosystem services and the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), which aims to clarify the matching relationship between the supply and demand of regional ecosystem services and optimize the allocation of basic resources. Based on SDG2, 6 and 12, supply – demand matching and correlation among food production, water production and carbon sequestration services are discussed with the InVEST model in Harbin. The results show that: (1) the three services are pairwise synergistic, and the supply and demand in urban areas with high population density are in short supply, which is different from the supply and demand matching from the surrounding areas; (2) due to the supply and demand deficit from these three services, the differences between supply – demand of ecosystem services are increased in Harbin, correcting the traditional supply and demand evaluation results. The research results can provide scientific basis for supply and demand matching and contribute to the promotion and implementation of SDGs.

Key words: sustainable development; ecosystem services; supply – demand matching; Harbin