水-能源-粮食纽带视角下哈尔滨生态系统健康时空变化评估*

李婷婷 吴远翔 潘宥承 孟德惠

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 150001

摘要:【目的】探讨不同时空序列下水-能源-粮食对生态系统健康的动态影响,为哈尔滨生态系统保护与管理提供科学依据,也为维持区域生态系统健康提供新的视角。【方法】以哈尔滨市为例,基于生态系统活力、组织力、弹性和供需比的评估框架,以水-能源-粮食纽带为切入点选取供需指标,应用 2000、2010、2020 年的土地利用数据测度与之相关的产水、固碳、粮食生产服务匹配程度和供需比,进而分析生态系统健康的时空变化。【结果】1)中心城区粮食生产服务在研究期内由赤字转为盈余状态,固碳和产水服务均为赤字状态;周边地区粮食生产服务大多为盈余状态,固碳和产水服务为赤字状态。产水服务供需匹配度基本处于不变状态,固碳服务呈下降趋势,粮食生产服务呈上升趋势,且各个服务间供需相关性均呈正相关关系。2)健康状况较差和一般的地区面积增加了 16.97%和 52.59%,较好和好的地区面积分别减少 64.35%和 5.13%。3)3 种服务导致供需赤字,加剧其健康状况的恶化程度。【结论】1)3 种服务供需指数均呈“中心城区低四周高”的空间格局,在中心城区供不应求,这与其周边地区供需匹配呈较大差异,且各服务间呈两两协同的关系。2)生态系统健康水平呈“中心城区低四周高”的空间格局,主要以较差、一般、较好和好为主;2000—2020 年,健康指数呈先上升后下降的趋势。3)3 种服务对生态系统服务供需比有直接影响,对传统评价结果起到修正作用。

关键词:水-能源-粮食纽带;生态系统健康;生态系统服务供需评价;哈尔滨

DOI:10.12169/zgcsly.2024.07.09.0005

Spatio-Temporal Variation Evaluation of Ecosystem Health in Harbin from the Perspective of Water-Energy-Food Nexus

Li Tingting Wu Yuanxiang Pan Youcheng Meng Dehui

(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 150001, China)

Abstract:【Objective】To explore the dynamic impacts of the water-energy-food nexus on ecosystem health in different temporal and spatial sequences, provide a scientific basis for ecosystem protection and management in Harbin, and also offer a new perspective for maintaining the health of the regional ecosystem.【Method】Taking Harbin as an example, the paper selects the supply-demand indicators with the water-energy-food nexus as the entry point based on the assessment framework of vigor, organization, resilience and supply-demand ratio of ecosystems. The land use data of 2000, 2010 and 2020 are applied to measure the matching degree and supply-demand ratio of the related services including water yield, carbon sequestration and food production, and analyze the spatio-temporal variation of ecosystem health.

收稿日期:2024-07-09

* 基金项目:国家自然科学基金项目(52478047)

第一作者:李婷婷(1994-),女,博士生,工程师,研究方向为生态规划。E-mail:534420294@qq.com

通信作者:吴远翔(1971-),男,博士,副教授,研究方向为城市绿色基础设施、生态系统服务。E-mail:745417816@qq.com

【Result】1）The food production service in the central area of Harbin shifts from a deficit to a surplus during the research period, while both services of carbon sequestration and water yield are still in a deficit state. The food production services in the surrounding areas are mostly in a surplus state, while the services of carbon sequestration and water yield are in a deficit state. The matching degree of supply and demand of water yield services remains basically unchanged, and the degree for carbon sequestration services shows a downward trend while the degree for food production services shows an upward trend. Moreover, the supply-demand correlations among each service are all positively correlated. 2）The areas in poor and general conditions increases by 16.97% and 52.59%, respectively in area. The areas in good and very good condition decrease by 64.35% and 5.13% in area, respectively; 3）The three services bring in supply-demand deficits, exacerbating the deterioration of their health conditions. 【Conclusion】1）The supply-demand indexes of the three services all show a spatial pattern of "low in the central urban area and high in the areas around". There is a shortage of supply in the central urban area, which shows a significant difference in the supply-demand matching with the surrounding areas, and a synergistic relationship exists among the services; 2）The ecosystem health level shows a spatial pattern of "low in the central urban area and high in the areas around", dominated with poor, general, good and very good conditions. From 2000 to 2020, the health index showed a trend of rising first and then decline; 3）The three services have a direct impact on the supply-demand ratio of ecosystem services and play a correcting role in the traditional evaluation results.

Keywords: water-energy-food nexus; ecosystem health; supply-demand evaluation of ecosystem service; Harbin

随着人类对自然资源需求的不断攀升，区域出现了水资源短缺、环境恶化以及耕地面积急剧减少等严峻问题[1]。鉴于生态系统在供给人类生态服务方面的核心作用，维持生态系统的健康状态成为实现自然与人类可持续发展的关键要素[2-3]。因此，对区域生态系统健康状况进行全面评估显得尤为迫切[4-6]。2011 年德国波恩年会上，霍夫首次引入了水-能源-粮食纽带（Water-Energy-Food-Nexus，WEF-Nexus）的概念。这次会议探讨了全球气候变化和社会变迁对水资源、能源和粮食生产消耗所产生的影响因素[7]。水、能源、粮食同时也作为联合国的《改变我们的世界：2030 年可持续发展议程》中 3 个重要发展目标[8]。因此，从水-能源-粮食纽带视角深入探索区域生态系统健康状况，不仅为生态系统的全面管理提供了坚实基础，而且对推动生态修复进程有指导性。

生态系统健康（Ecosystem Health，EH）是衡量生态系统质量的关键指标，它体现在人为活动的干扰下，生态系统依然能够保持其原有组织和活力的完整性，并能持续满足人类社会合理需求的能力[9-10]。因此，建立适当的评价指标体系是区域 EH 评估的关键。目前适用于区域 EH 评估框架定量方法主要可分为 3 类[11-12]：活力-组织力-弹性-生态系统服务（VORS）[13-14]、压力-状态-响应（PSR）[15]、基于复杂生态系统理论的自然-社会-经济子系统[16]。VORS 框架体系已经发展到活力-组织力-弹性-供需比（VORESDR），该框架更能从人地耦合的思想出发并整合了生态系统完整性以及人类对生态系统服务的需求。从研究尺度来看，县域尺度在东北地区的生态管理中是最佳选择[17]。然而，这些研究大多是从人类与生态系统耦合的视角展开的，缺乏从影响因素内部视角出发探讨维持区域 EH 的作用机制[17]。鉴于水、能源与粮食是人类生存不可或缺的基础，亟需在水-能源-粮食纽带关系中将供需匹配状况纳 EH 框架开展一系列研究。

哈尔滨有着较多的重工业设施、良好的生态资源和丰富的农业资源，由于产业结构和资源分布的匹配存在空间错位，导致该地区资源供需情况矛盾突出，进而影响区域的环境。鉴于此，以哈尔滨市为例，应用 2000、2010、2020 年的时间序列土地利用数据，基于生态系统活力、组织力、弹性和供需比框架的区域 EH 评估方法，以水-能源-粮食纽带为切入点选取生态系统服务供需指标，使用 InVEST 模型测度区域产水、固碳、粮食

生产服务的供需量和区域 EH 时空分布变化，探讨不同时空序列下水-能源-粮食对 EH 的动态影响，为哈尔滨生态系统保护与管理提供科学依据，也为维持区域 EH 提供新的视角。

1 研究区概况

哈尔滨（125°42′—130°10′E，44°04′—46°40′N）现辖 9 个行政区、7 个县以及 2 个县级市，总面积约 53 068 km^2；西南部地势较为平缓，东部地形复杂，主要以山地、丘陵为主。土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地 6 类，其中林地主要集中分布于周边市县山区，耕地广泛分布在中心城区周边区域和市县城区的周边区域。2000—2020 年，林地和耕地面积都略有减少，其面积占比都在 44%左右，水域、建设用地、草地、未利用地分别占总面积不到 10%（表 1）。

2 研究方法

2.1 数据来源

本研究基础数据如表 2 所示。

表 1 2000、2010、2020 年哈尔滨土地利用面积变化 hm^2

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	2 367 584.81	2 353 650.43	103 312.49	328 076.89	158 548.82	371.97
2010	2 384 206.42	2 305 499.63	147 083.18	291 245.08	180 434.99	3 140.70
2020	2 352 579.00	2 312 078.42	116 275.15	351 382.11	178 363.73	820.16

表 2 数据来源

数据名称	数据来源	空间分辨率
行政边界	资源环境科学数据平台(http://www.resdc.cn)	
土地覆盖数据		30 m
数字高程模型 DEM		30 m
归一化植被覆盖指数 NDVI	1 km	
人口密度数据	WorldPop(http://www.worldpop.org)	1 km
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	
碳排放数据	中国碳核算数据 CEADs(http://www.ceads.net/)	
降水量	国家生态科学数据中心	1 km
蒸散发量	(http://www.nesdc.org.cn)	1 km
根系深度、土壤质地和有机碳含量	《基于世界土壤数据库 HWSD 的中国土壤数据集》(V1.1)(http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data)	30″
需水量	哈尔滨市水资源公报	

2.2 生态系统健康评价

EH 的量化采用了生态系统自然健康与综合生态系统服务供需比的乘积来表征[18-19]。具体而言，生态系统自然健康涵盖 3 个维度，即生态系统活力、组织力和弹性；而综合生态系统服务的供需比则是通过整合产水、固碳及粮食生产 3 项服务的供需状况进行系统性评估[20]。公式如下：

$$EH = \sqrt{EPH \times CEDSR} \quad (1)$$

式（1）中：EH 为生态系统健康；EPH 为生态系统自然健康；CESDR 为综合生态系统服务供需比。为了各个指标之间方便计算，对各指标进行归一化处理，其中 EH 的取值范围为［0，1］，基于自然断点法将健康水平分为 5 个等级：差、较差、一般、较好、好[21]。

生态系统自然健康（EPH）的评价代表了 EH 评价的传统概念，指标为生态系统活力、组织力和弹性[22]。生态系统活力是指初级生产力，用归一化植被指数（NDVI）数据来评估[23-25]。生态系统组织力是指生态系统的结构稳定性，由景观异质性、景观连通性和林地斑块连通性决定[26]。其中，景观异质性由香农多样性指数和面积加权平均分形维数表征；景观连通性由景观破碎指数和景观聚集指数表征；林地斑块由林地破碎指数和林地斑块内聚力指数表征。生态系统弹性是自然生态系统在遭遇外部扰动后重新建立其原有结构完整性与功能的能力[26-27]。弹性水平通过计算各类土地利用面积占比与相应弹性系数的乘积，并以乘积的加权求和来表征[22]。

2.3　水-能源-粮食纽带与生态系统服务供需评价

2.3.1　产水服务

产水服务是指除去地表径流和蒸散作用，生态系统从降水中获得的可供人类利用水资源的能力。其中产水量的量化计算采用 InVEST 模型的 Annual Water Yield 工具，计算各栅格单元年度内的产水量，具体公式参考该模型的用户指南。需水量的量化计算结合各区县统计年鉴中工业、农业、居民生活用水量数据以及年常住人口数据得出区域年人均用水量，借助人口密度数据将用水量统计数据赋值于栅格单元中。

2.3.2　固碳服务

碳储存量采用 InVEST 模型的 Carbon Storage and Sequestration 工具进行量化评估。该模型将碳储存量划分为四个核心组成部分：地上生物量碳量、地下生物量碳量、土壤有机碳量以及死亡有机质碳量，其总和即为研究区域的碳储存量。另外，固碳需求量通过计算人均碳排放量（包括煤炭、石油、天然气等燃料）来确定。具体而言，该需求通过区域人均碳排放量与人口密度的乘积关系来表征，其中碳排放主要来源涵盖能源消耗、工业生产排放、交通运输排污、农业活动排污、森林砍伐导致的碳排放以及建筑行业的排放等，这些均与人类活动相关。

2.3.3　粮食生产服务

粮食生产量通过每个栅格的 NDVI 值与区域内耕地总 NDVI 值的比值确定占比系数，利用此系数将整体的粮食产量精确分配至各个栅格单元内。粮食需求量则基于人口统计学方法，采用人均粮食消费量与人口密度的乘积进行量化表征，从而构建粮食供需关系的空间评估模型。

2.3.4　生态系统服务时空异质性

构建生态系统服务供需指数（SDI）来表征供需匹配情况[28]。公式如下：

$$SDI_i = \frac{ESS_i - ESD_i}{ESS_i + ESD_i} \tag{2}$$

式（2）中：SDI_i为地区 i 的供需指数；ESS_i和 ESD_i分别表示供给量和需求量。$SDI_i>0$ 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。

2.3.5　生态系统服务供需评价关系

从水-能源-粮食的视角出发，即产水、固碳、粮食生产服务，借助 InVEST 模型量化这些服务的总供给量、总需求量及其综合供需比，以全面评估生态服务的平衡状态[29]。公式如下：

$$\begin{aligned} TESS &= \sum_{i=1}^{n} ESS_i \\ TESD &= \sum_{i=1}^{n} ESD_i \\ ESDR &= \frac{ESS - ESD}{(ESS_{max} + ESD_{max})/2} \\ CESDR &= \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{1} ESDR_i \end{aligned} \tag{3}$$

式（3）中：TESS、TESS、CESDR 分别为生态系统服务总供给量、总需求量、综合供需比；n 为生态系统服务的类型数，$ESDR_i$代表第 i 个生态系统服务供需比。

3　结果与分析

3.1　哈尔滨生态系统自然健康时空变化特征

由图 1 可知：空间分布上，东部、东南部和北部地区因植被覆盖率高且人类活动干扰较小，呈现较高的健康指数；西部中心城区健康指数相对较低。从时间上看，2000—2020 年，研究期前 10 年自然健康指数由 0.49 上升至 0.50，变化不明显，后 10 年由于建设用地面积持续增加使得指数下降至 0.45。

3.2　哈尔滨生态系统服务时空异质性

3.2.1　供需匹配

2000—2020 年哈尔滨区县产水服务供需指数有一定的差异（表 3）。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。从空间分布（图 2）看，总体区县供需指数呈赤字状态，说明供需分布与建设用地不匹配。

2000—2020 年哈尔滨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 3）。其中，通河县赤字程度最低，中心城区区域赤字最为严重且有向周边区县蔓延的趋势。从空间分布（图 2）看，少部分森林和耕地呈现出供需相对平衡的状态，这主要归因于其有较高的碳汇能力，并且区县的人口密度较低，使得能源排放与能源需求均保持在较低的水平，中心城区的供需处于失衡状态。

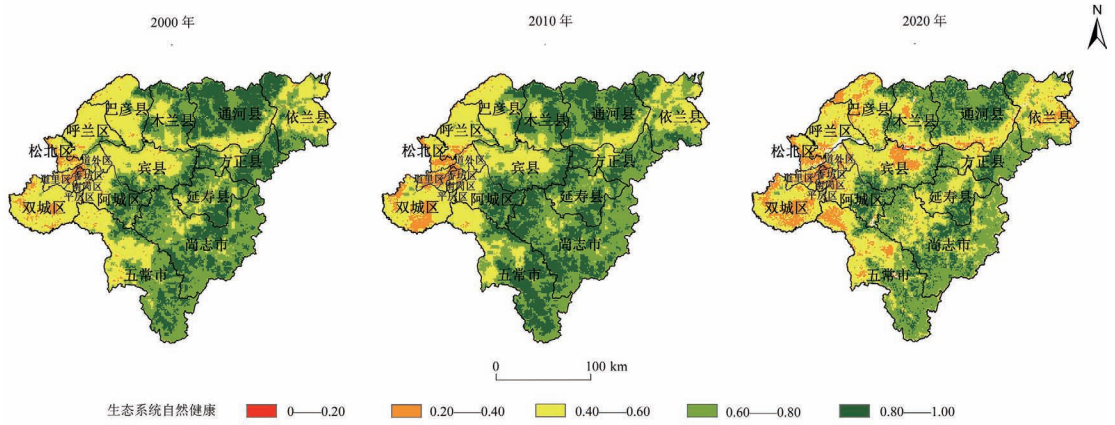


图 1 2000、2010、2020 年哈尔滨生态系统自然健康时空变化

2000—2020 年哈尔滨区县粮食生产服务供需指数总体呈上升趋势。中心城区区域、双城区、巴彦县、宾县供需指数呈赤字状态；2000—2010 年尚志市、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 年呈盈余状态；通河县从 2000—2020 年供需指数呈盈余状态（表 3）。从空间分布（图 2）看，耕地多、人口少的地区粮食大多供大于求，中心城区由于耕地少、人口多，普遍对粮食需求大。

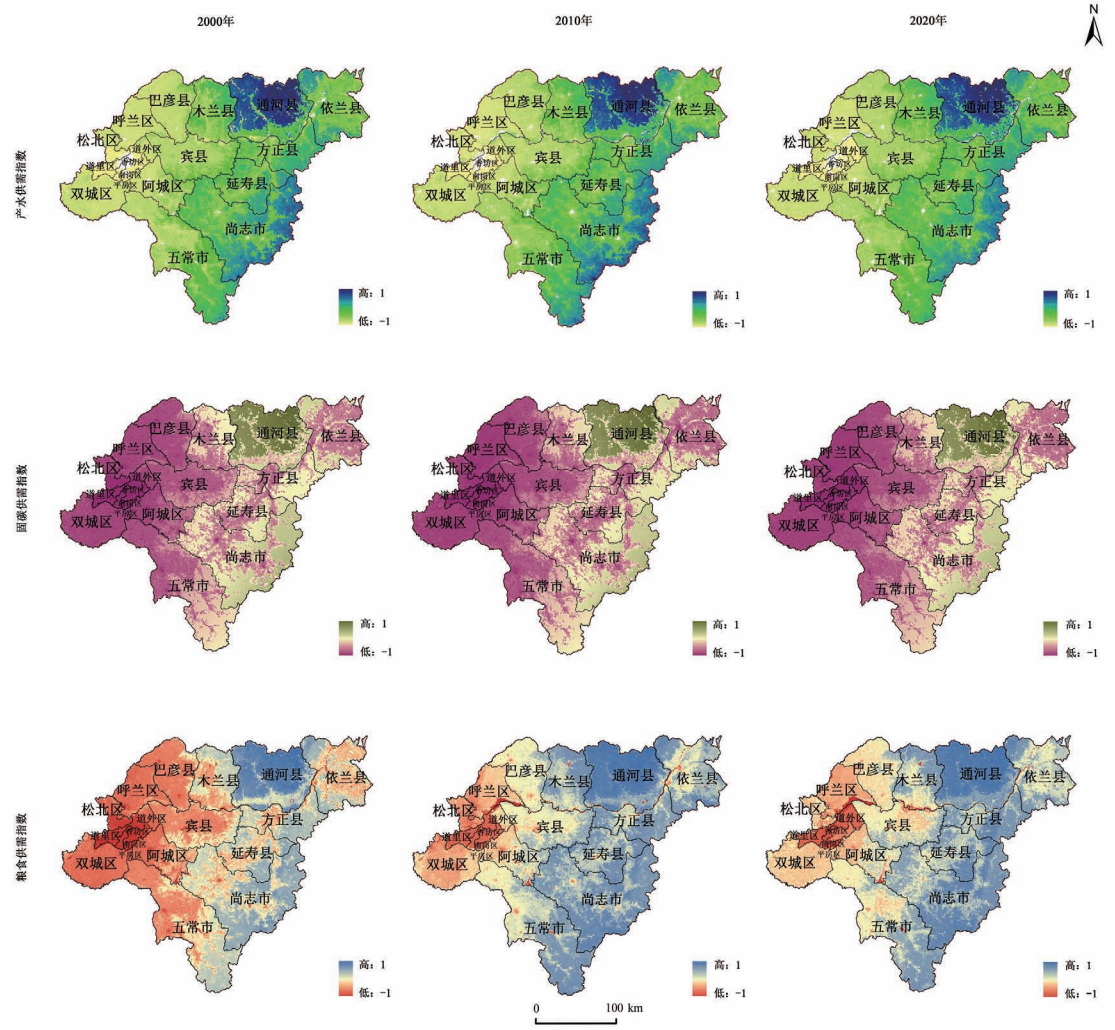


图 2 2000、2010、2020 年哈尔滨生态系统服务供需指数时空分布

表 3　2000、2010、2020 年哈尔滨各区县生态系统服务供需指数

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

3.2.2　相关性分析

由表 4 可知：在供给方面，产水-粮食生产服务之间为显著正相关关系，降水量是产水服务的主要因素，同时也表明降水量影响着研究区的粮食生产情况；固碳-粮食生产与产水-固碳均为显著正相关关系。在需求方面，相关性系数均接近 1，说明 3 种服务两两相关性为正相关，均为协同关系。

表 4　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**

注：** 表示在 0.01 水平上显著相关。

3.3　哈尔滨生态系统健康时空变化特征

3.3.1　生态系统服务供需格局时空变化特征

由图 3 可知：从空间分布看，哈尔滨供需比在空间上呈东高西低的趋势，其四周森林、草地及山区的供需比相对较高，这主要归因于东南和北部地区生态基础设施较好；西部中心城区因其建设用地面积较大与密集的人口匹配不均，导致城区供给能力不足。从时间上看，哈尔滨西部地区的总供给能力持续减弱，而总需求则不断攀升，这使得中心城区的供需矛盾日益加剧。

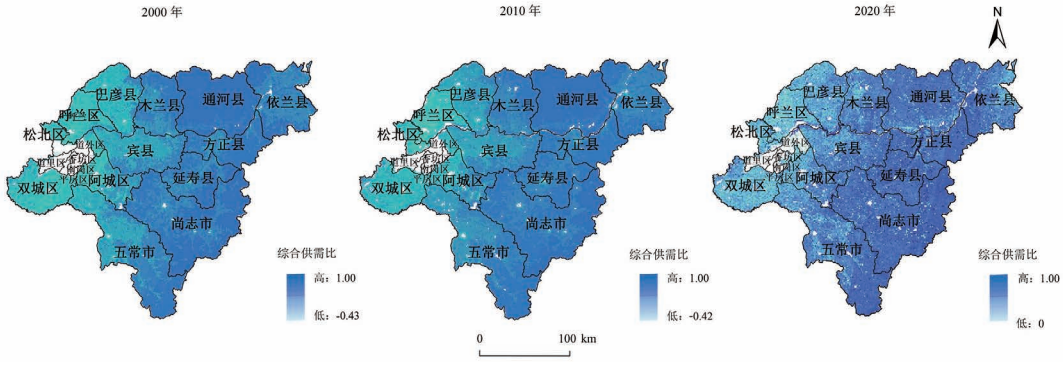


图 3　2000、2010、2020 年哈尔滨综合生态系统服务供需格局

3.3.2　生态系统健康水平变化

由图 4~5 可知，哈尔滨 EH 空间分布具有明显的空间异质性，EH 水平主要以较差、一般、较好、好为主。健康状况较差和差的区域主要分布在中心城区，并有向周围扩散的趋势；一般和较好的区域主要分布在四周山区。从时间上看，2000—2020 年 EH 呈先上升后下降的变化趋势，其健康指数平均值由 2000 年的 0.67 增加至 2010 年的 0.69，到 2020 年再下降至 0.48，这表明生态环境有所恶化。研究期的前 10 年可能由于退耕还林政策的实施使得环境得以好转，后 10 年由于东北地区城市化进程加剧导致环境质量下降。较差和一般的地区主

要集中在中心城区和其周围的耕地，面积分别增加16.97%和52.59%，并且情况继续恶化；较好和好的区域集中在周边市县的山区，其面积受城区环境恶化扩散的影响分别减少了64.35%和5.13%。

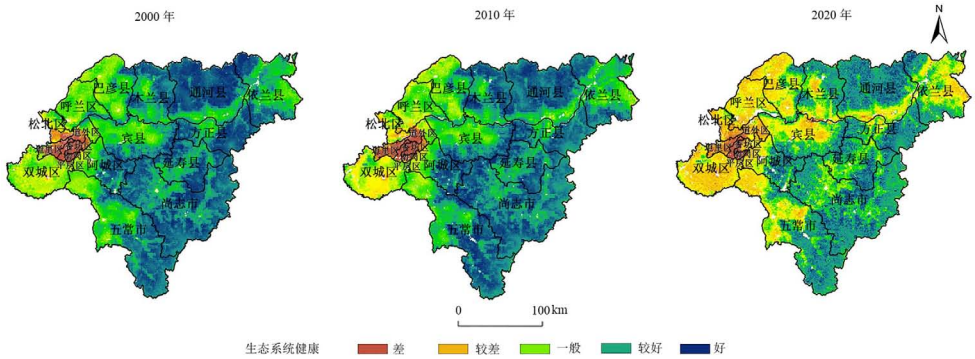


图4 2000、2010、2020年哈尔滨生态系统健康格局

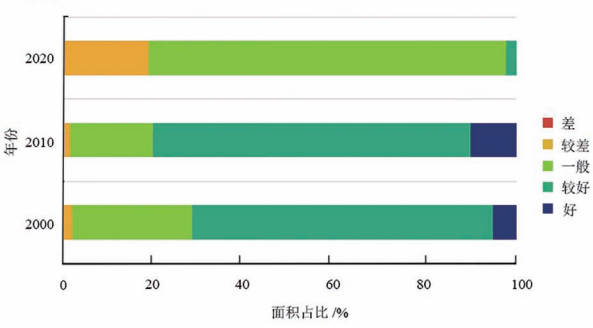


图5 2000、2010、2020年哈尔滨生态系统健康水平

4 讨论

生态系统服务供需匹配机制受自然资源变化驱动的影响。研究显示：2000—2020年，哈尔滨市域的产水服务供需匹配度基本维持稳定，固碳服务呈现下降趋势，而粮食生产服务则呈现上升趋势。究其原因，可能是随着哈尔滨产水量的增长和农业技术的进步，单位面积粮食产量稳步提高，进而带动了粮食供给服务的显著增长。然而，城市化加剧水资源供需矛盾，碳储量与排放空间分布不均，这与安志英等[17]研究结果一致。研究尺度上，已有研究证明了随着尺度的缩小，生态系统服务供需指数(SDI)内部差异逐渐明显[17]。因此，选用县域尺度是研究供需匹配的最佳选择。

本研究聚焦于与人类紧密相关的水、碳、粮三大关键资源，旨在揭示哈尔滨可持续发展核心要素，为政府制定区域生态管理策略提供科学依据。研究结果显示：水、能源、粮食系统间相互作用，即粮食需求扩张促使水资源需求激增，其加工过程涉及能源消耗，彰显了各服务间的依赖与互馈。研究区内3种服务供需空间配置失衡，导致供需赤字，加剧了EH状况的恶化。根据Pan等[14]等人的研究结果，VORESDR框架不仅能够客观衡量区域EH的实际状况，还能考虑到人类的利益，可以加强自然与人类生态系统的关系。以往研究大多从独立视角探讨EH与城镇化、人口密度、经济结构等因素的关系，鲜有从供需匹配角度探究对EH水平的影响[30-31]，本结果更新了刘芳锐等[19]将生态服务供需指标引入“活力-组织力-弹性”框架的研究视角。

EH评估是一个综合系统的过程，生态系统涉及复杂多样的要素，目前的研究只能揭示供需空间、数量和配比上对VORESDR框架的影响，不能充分反应其内部之间的驱动机制。本研究证明了生态系统自然健康、供需比和生态系统健康变化趋势的一致性。政府应采取政策缓解矛盾，如划定基本耕地保护区以缩小粮食供需差距，并加强城市绿地与生态保护区的建设与维护，以提升固碳和粮食生产能力。本研究的评估框架可拓展至东北其他供需矛盾区域，为理解自然与社会经济系统关系提供新视角。

5 结论

从空间格局上看，产水、能源、粮食生产服务3种服务供需指数均呈“中心城区低四周高”的空间格局。从时间上看，研究区固碳、粮食服务供需匹配度变化较大，产水服务基本不变。从供需方面上看，3种服务呈两两协同的关系。

从空间格局上看，哈尔滨EH水平呈现“中心城区低四周高”的空间格局，主要以较差、一般、较好和好为主。从时间上看，EH指数呈先上升后下降的趋势。

产水、能源和粮食生产服务作为关键生态系统服务类型，其供需比的动态变化直接调控着区域生态系统服务的匹配状态。这种调控效应通过将供需匹配度引入 EH 评价中，从而对传统 EH 评估模型起到修正作用。

参考文献

[1]LU Y L, WANG R S, ZHANG Y Q, et al. Ecosystem health towards sustainability[J]. Ecosystem Health and Sustainability, 2015,1(1):1-15.

[2]刘焱序,彭建,汪安,等.生态系统健康研究进展[J].生态学报,2015,35(18):5920-5930.

[3]马淇蔚.生态管控区城市扩张形态对生态系统服务价值的影响[J].中国城市林业,2024,22(6):35-43.

[4]孙燕,周杨明,张秋文,等.生态系统健康:理论/概念与评价方法[J].地球科学进展,2011,26(8):887-896.

[5]孔红梅,赵景柱,吴钢,等.生态系统健康与环境管理[J].环境科学,2002,23(1):1-5.

[6]HE J H, PAN ZZ, LIU D F, et al. Exploring the regional differences of ecosystem health and its driving factors in China[J]. Science of the Total Environment,2019,673:553-564.

[7]ENDO A,TSURITA I,BURNETT K,et al.A review of the current state of research on the water,energy,and food nexus[J].Journal of Hydrology:Regional Studies,2017,11:20-30.

[8]CHEN H G, ZHANG Y P. New biorefineries and sustainable agriculture:increased food, biofuels, and ecosystem security[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2015,47:117-132.

[9]PENG J, LIU Y X, LI T Y, et al. Regional ecosystem health response to rural land use change: a case study in Lijiang City, China[J].Ecological Indicators,2017,72:399-410.

[10]WU J S,CHENG D J,XU Y Y,et al.Spatial-temporal change of ecosystem health across China:Urbanization impact perspective[J]. Journal of Cleaner Production,2021,326:129393.

[11]CUI N, FENG C C, HAN R, et al. Impact of urbanization on ecosystem health: a case study in Zhuhai, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(23):4717.

[12]SU M R, XIE H, YUE W C, et al. Urban ecosystem health evaluation for typical Chinese cities along the Belt and Road[J]. Ecological Indicators,2019,101:572-582.

[13]COSTANZA R.Ecosystem health and ecological engineering[J]. Ecological Engineering,2012,45:24-29.

[14]PAN Z Z,HE J H,LIU D F,et al.Ecosystem health assessment based on ecological integrity and ecosystem services demand in the Middle Reaches of the Yangtze River Economic Belt,China[J]. Science of the Total Environment,2021,774:144837.

[15]NERI A C,DUPIN P,SÁNCHEZ L E.A pressure-state-response approach to cumulative impact assessment[J].Journal of Cleaner Production,2016,126:288-298.

[16]WIEGAND J,RAFFAELLI D,SMART J C R,et al.Assessment of temporal trends in ecosystem health using an holistic indicator[J]. Journal of Environmental Management,2010,91(7):1446-1455.

[17]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.

[18]PATIL G P,BROOKS R P,MYERS W L,et al.Ecosystem health and its measurement at landscape scale:toward the next generation of quantitative assessments[J].Ecosystem Health,2001,7(4):307-316.

[19]刘芳锐,张正栋,王欣怡,等.粤港澳大湾区生态系统健康时空变化及其对城镇化的响应[J].生态学报,2023,43(7):2594-2604.

[20]MENG L R,HUANG J,DONG J H.Assessment of rural ecosystem health and type classification in Jiangsu province, China[J]. Science of the Total Environment,2018,615:1218-1228.

[21]段树国,奚秀梅.塔里木河流域生态系统健康评价指标体系的构建[J].云南地理环境研究,2007,19(5):114-117.

[22]PENG J,LIU Y X,WU J S,et al.Linking ecosystem services and landscape patterns to assess urban ecosystem health:a case study in Shenzhen City, China[J]. Landscape and Urban Planning, 2015,143:56-68.

[23]MASEK J G.Stability of boreal forest stands during recent climate change:evidence from Landsat satellite imagery[J]. Journal of Biogeography,2001,28(8):967-976.

[24]SCANLON T M,ALBERTSON J D,CAYLOR K K,et al.Determining land surface fractional cover from NDVI and rainfall time series for a savanna ecosystem[J]. Remote Sensing of Environment, 2002,82(2/3):376-388.

[25]PETERSON G D.Contagious disturbance, ecological memory, and the emergence of landscape pattern[J]. Ecosystems, 2002, 5(4):329-338.

[26]COLDING J.'Ecological land-use complementation' for building resilience in urban ecosystems[J]. Landscape and Urban Planning,2007,81(1/2):46-55.

[27]FOSTER D, SWANSON F, ABER J, et al. The importance of land-use legacies to ecology and conservation[J]. BioScience, 2003,53(1):77.

[28]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(9):1921-1937.

[29]BURKHARD B, KROLL F, NEDKOV S, et al. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets[J]. Ecological Indicators, 2012,21:17-29.

[30]LI W J, WANG Y, XIE S Y, et al. Spatiotemporal evolution scenarios and the coupling analysis of ecosystem health with land use change in Southwest China[J]. Ecological Engineering, 2022,179:106607.

[31]LI W J,XIE S Y,WANG Y,et al.Effects of urban expansion on ecosystem health in Southwest China from a multi-perspective analysis[J].Journal of Cleaner Production,2021,294:126341.