

城市空间生态资产评估及其人地关系内涵 ——以武汉市府河湿地为例

甘依霖^{1,2}, 罗 静^{1,2}, 朱媛媛^{1,2}, 罗名海³, 田玲玲^{1,2}

(1. 华中师范大学地理过程分析与模拟湖北省重点实验室/城市与环境科学学院, 武汉 430079; 2. 湖北省人民政府研究室/华中师范大学湖北高质量发展研究院, 武汉 430079; 3. 武汉市测绘研究院, 武汉 430022)

摘要: 估计生态系统的城市空间资产研究, 对量化核定生态资产、调控城市人地关系具有重要意义。本文以武汉府河湿地为例, 通过构建城市空间生态资产评估框架, 分析生态资产变化及其人地关系内涵。结果显示: (1) 2015—2021年, 府河湿地丰富了城市空间资产的生态价值供给, 在生态工程的作用下存量资产质量提升、流量资产总量较高、上下游资产供给相对不均衡; (2) 居民对府河湿地的生态游憩需求提升, 表现为数量增长与空间拓展, 并存在距离衰减和闲暇时间约束的特征; (3) 府河湿地内部系统呈现供需不均衡格局, 远距离形成生态—人类活动相互作用发展趋势, 拓展了人地系统耦合的空间尺度。这种远端相互作用与内部耦合的结合, 构成新时期城市空间生态系统的人地耦合模式。研究结果为系统量化城市空间生态资产及其效应提供参考, 为推进生态系统服务与人类福祉协调平衡提供科学依据。

关键词: 生态资产; 城市生态系统; 人地关系; 府河湿地

世界发展报告《变革世界中的可持续发展》(2003年)指出, 在可持续的发展框架下, 应当关注更广泛意义的资产组合, 包括自然资产、人力资产、人造资产、知识资产与社会资产等^[1], 促使在自然系统与经济系统、社会系统间, 实现人类区域空间资产的代际流量稳定^[2]。其中, 环境与生态系统被视作一种自然资产, 被纳入财富的框架, 不仅突破了传统经济学关于“自然的无偿馈赠”的定义^[3], 也逐步成为国家政治议程的重中之重^[4]。如何定义并量化自然(生态)资产, 成为探索生态产品价值实现、保障经济发展与生态保护并行不悖的重要途径^[5]。

目前, 国际上较多提及自然资本(Natural Capital)^[6]、生态系统服务价值(Ecosystem Service Value)^[7]等概念, 而国内延伸并发展了“生态资产(Ecosystem Asset)”的概念体系, 认为生态资产包含作为“存量”的自然资本和作为“流量”的生态系统服务价值^[8]。生态资产存量以自然资源的数量和质量表示; 生态资产流量则指生态系统持续产出的产物或由于其存在而持续发生的效应^[9], 是人类从自然环境中获得各种服务福利的价值体现^[10]。相关研究涵盖了生态网络格局与分区优化^[11]、生态资产价值与损益^[12]、生态与经济发展耦合协调状态^[13]、价值服务与居民福祉的关系^[14]等方面, 形成了生态系统生产总

收稿日期: 2022-08-08; 修订日期: 2023-01-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(42271228, 41871176, 42071170, 42001185)

作者简介: 甘依霖(1996-), 女, 四川成都人, 博士研究生, 研究方向为区域发展与城乡规划。

E-mail: ganyilin@mails.ccnu.edu.cn

通讯作者: 田玲玲(1988-), 女, 湖北宜昌人, 博士, 讲师, 研究方向为区域发展与城乡规划。

E-mail: tian2018@mail.ccnu.edu.cn

值(GEP)^[15]、生态系统服务价值当量^[16]、土地资源资产负债^[17]、生态补偿额度^[18]等核算评估方法,试点探索了全国^[12]、城市群^[11]、省域^[15]等多尺度以及草地^[19]、湿地^[20]、流域^[16]、矿区^[21]等多类型的生态价值测算。整体来看,研究要素的尺度偏向宏观,侧重于社会、经济、自然等方面大目标的规划与大尺度的区域价值评价,推进了生态资源资产化的量化核定工作。

事实上,随着生态研究工具适用性与精确性的技术提升,尽管通过“计算”的方式能够为城市生态规划提供科学依据,但在某种程度上仍是忽视了人地关系的初衷和意义^[22]。这有必要突破要素间简单和静态的描述,由分析性向系统性思维转换,站在地理学人地系统的视角研究人地关系,借鉴生态系统的思想审视人地关系^[22]。国内生态系统领域的现有研究已在生态城市与人地关系、生态系统服务与人地系统耦合^[23]等方面做出了理论探索,然而在面向城市微观过程生态变化和小尺度精细化管控方面仍未形成系统化的分析框架,缺乏城市局域生态空间单元的有效探索,难以准确衡量生态资源的资产化表征以及人类社会的生态惠益。

据此,本文基于地理学人地关系论视角,以武汉市府河湿地这一典型的城市生态系统为例,通过构建城市空间生态资产评估框架,分析城市生态系统的资产类型及变化特征,并解析该变化过程所蕴含的人地关系内涵。以期为拓展空间资产在自然资源领域的研究,量化自然(生态)系统在城市人地系统中的效应,为人地关系迈向调适与共生提供一定的参考依据。

1 城市空间生态资产的内涵审视与框架构建

1.1 顾及生态系统的空间资产研究内涵

传统经济学逻辑下,强调经济社会服务所反映的财富状况,关注社会经济系统的空间资产问题,认为生态系统服务和产品不具备价值。批判这一逻辑谬误的生态经济学认为生态系统提供的产品和服务流对人类产生了巨大的惠益,这种惠益应该纳入到财富的框架内^[9]。对此,生态系统产品和服务作为连接生物物理过程(自然生态系统)和人类福祉(社会经济系统)的桥梁^[23],无疑成为人地关系的重要媒介。其研究有必要立足人地关系地域系统,关注自然和经济社会两方面:既强调产品与服务产生的生态资产供给,同时重视人类从自然中获得惠益的生态系统服务需求^[23]。

1.2 城市空间生态资产的研究框架

通过区分城市空间生态系统的供给能力和需求水平,结合人一地要素、功能流动状态,本文搭建了基于人地关系的城市空间生态资产评估框架,从价值维度链接自然系统与社会经济系统,从空间尺度交互自然过程与人文过程(图1)。生态系统供给考

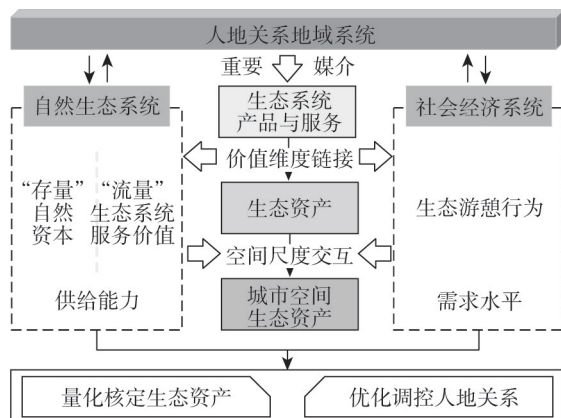


图1 城市空间生态资产的研究框架

Fig. 1 The research framework of urban spatial ecosystem assets

考虑研究区存量与流量生态资产价值量，生态系统需求以城市居民生态游憩行为表征需求水平，通过对比供需均衡状态及空间格局特征，揭示府河湿地生态系统价值显化与需求变化所内涵的人地关系启示，引导自然—社会经济系统实现人地关系的调适。

2 研究方法与数据来源

2.1 研究区概况

武汉府河湿地位于长江中下游平原地区，横跨东西湖区、黄陂区与江岸区三个行政区域，连接武汉临空经济区和长江新区两大城市经济区，全长约38.5 km，最大宽度2.3 km，最小宽度0.1 km，面积约35.9 km²，呈狭长型分布（图2）。功能上，其属于河流型湿地，水域和河滩面积较大，为武汉市重要的分蓄洪区及城市生态绿楔，在涵养水源、保持水土、提高防洪抗旱能力等方面发挥着不可替代的作用。

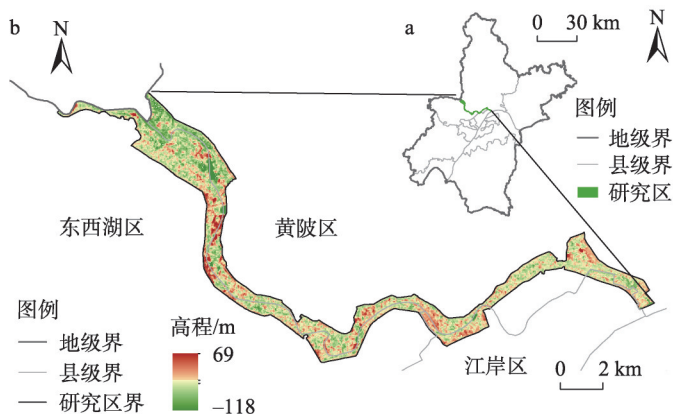


图2 研究区区位

Fig. 2 Location of the study area

2022年11月，《湿地公约》第十四届缔约方大会在武汉举行，会议正式通过《武汉宣言》，提出“开展湿地及其生态系统服务的自然资源评估和核算”“保护、修复和可持续管理城市和郊区的湿地”。府河湿地作为武汉市重要的湿地生态系统之一，自2015年以来在多项生态工程作用下，水体生态环境得到修复且城市湿地公园建设不断推进，已成为超大城市经济集聚区生态建设的重要支点，是城市局域生态空间的典型地域单元。在武汉市面向2035年的国土空间规划中，提出以天河航空高铁枢纽为核心打造临空经济区，府河湿地将成为临空副城重要的生态保育和游憩空间；2020年长江新区启动府河出口河段综合整治工程，建成后府河湿地将成为长江新区重要的水生态文化绿廊，促进长江新城起步区快速发展。在此背景下，评估府河湿地生态资产并探讨其蕴含的人地关系启示，能为以武汉为代表的湿地城市建设以及生态城市发展提供科学参考。

2.2 数据来源

研究数据主要包括地理空间数据、社会经济统计数据 and 大数据三类。其中，地表覆盖数据源于武汉市基础性地理国情普查与监测结果（2015年、2021年），重分类后转换为生态系统类型，包括农田（种植土地）、林地、草地、水域、荒漠等。NPP数据源于

MOD17A3HGF.006 产品（2015—2021 年），空间分辨率 500 m。DEM 数据源于 ASTER GDEM V2 数据，空间分辨率 30 m。农业总产值和农作物播种面积数据源于《武汉统计年鉴》《全国农产品成本收益资料汇编》（2021）；水质数据源于《武汉市地表水环境质量状况》（2015—2021 年）。居民出行轨迹等通信大数据源于 2017 年和 2019 年武汉市联通手机信令数据的游憩部分。

2.3 研究方法

2.3.1 生态存量资产评估方法

生态存量资产以生态资源资产的面积、质量为主要指标，评估区域生态存量资产的变化特征。一方面，基于府河湿地地表覆盖类型数据，统计确定不同类型生态系统的面积及占比，确定研究区主要存量资产组合。另一方面，存量资产质量以生物量、植被覆盖度、水质和坡度分别作为林地、草地、水域和农田的评价指标，荒漠生态系统暂未进行质量等级划分。具体评价指标、方法和分级标准见表 1^[15,24]。

表 1 府河湿地生态存量资产核算指标与方法

Table 1 Accounting index and method of ecological stock assets in Fuhe wetland

生态存量 资产类型	评价指标	评价方法	质量等级				
			优	良	中	差	劣
林地	相对生物 量密度/%	$EAQ_{ij} = \frac{B_{ij}}{CCB_i} \times 100\%$ (1) 式中： EAQ_{ij} 为 i 类生态存量资产 j 像元的生态存量资产质量； B_{ij} 为 i 类生态存量资产 j 像元的生 物量； CCB_i 为 i 类生态存量资产 顶级群落像元的生物量	≥ 80	[60, 80)	[40, 60)	[20, 40)	< 20
草地	植被覆盖 度/%	$EAQ_{ij} = \frac{C_{ij}}{CCC_i} \times 100\%$ (2) 式中： EAQ_{ij} 为 i 类生态存量资产 j 像元的生态存量资产质量； C_{ij} 为 i 类生态存量资产 j 像元的植 被覆盖度； CCC_i 为 i 类生态存量 资产顶级群落像元的覆盖度	≥ 80	[60, 80)	[40, 60)	[20, 40)	< 20
水域	水质	水质监测数据	I类	II类	III类	IV类	V类 及以下
农田	坡度/(°)	坡度	< 2	[2, 6)	[6, 15)	[15, 25)	≥ 25
荒漠	—	—	—				

借鉴生态资产指数法^[25]，将面积占比与质量等级加权，得到生态存量资产质量指数^[12]，以衡量不同类型生态存量资产的综合状况。具体计算方法如下^[12,25]：

$$EAQI_i = \frac{\sum_{j=1}^5 (EA_{ij} \times j)}{(EA_i \times 5)} \times \frac{EA_i}{S} \times 100\%$$

(3)

$$EAQI = \sum_{i=1}^k EAQI_i = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^5 (EA_{ij} \times j)}{\sum_i (EA_i \times 5)} \times \frac{\sum_i EA_i}{S} \times 100\%$$

(4)

式中： i 为生态存量资产类型； j 为生态存量资产等级权重因子（依据生态质量等级从优到劣分别赋5、4、3、2、1不同权重）； EA_i 为第*i*类生第*j*等级生态存量资产的面积（ km^2 ）； $EAQI_i$ 为第*i*类生态存量资产指数； k 为区域的生态存量资产类型种类数； $EAQI$ 为生态存量资产综合指数； S 为研究区总面积（ km^2 ）。

2.3.2 生态流量资产评估方法

生态资产流量强调生态资产提供的生态系统服务。本文借鉴 Costanza 等^[26]构建的“全球生态系统服务功能评价模型”以及谢高地等^[27]修正的“中国生态系统生态服务价值当量表”，主要考虑生态系统的供给服务、支持服务、调节服务和文化服务四类价值，采用价值当量法进行核算。根据谢高地等^[27]的研究定义，按照 1 hm^2 全国农田平均粮食产量的经济价值为 1，得到重分类后的单位面积生态系统服务价值基础当量表（表 2）。结合府河湿地实地情况，进一步对研究区单位面积农田每年自然粮食产量的经济价值进行计算修正：

$$E_a = \frac{1}{7} \sum_{l=1}^n \frac{m_l p_l q_l}{M} \quad (l=1, \cdots, n)$$

(5)

式中： E_a 为单位面积农田生态系统服务提供食物生产服务功能的经济价值（元/ hm^2 ）； l 为作物种类； n 为研究区主要农作物的总类别数（个）； m_l 为第*l*种农作物播种的总面积（ t/hm^2 ）； p_l 为第*l*种农作物的全国平均价格（元/ t ）； q 为第*l*种农作物的单产（ t/hm^2 ）； M 为*n*种农作物的总播种面积（ hm^2 ）；1/7是指在没有人力投入的自然生态系统提供的经济价值是现有单位面积农田提供的食物生产服务经济价值的 1/7。

通过统计 2015—2020 年武汉市稻谷、小麦和玉米三种主要农作物的播种面积、产值的年均值，以及全国平均价格的年均值，确定研究区 1 标准单位生态系统服务价值当量因子价值量为 2527.69 元/ hm^2 。将标准单位当量因子价值量与研究区各地表覆盖类型的价值当量及面积加乘，得到府河湿地研究区生态系统服务价值总量。

表 2 单位面积生态系统服务价值当量
Table 2 Ecosystem service equivalent value per unit area

生态服务类型		农田	林地	草地	水域	荒漠
供给服务	食物生产	1.00	0.23	0.21	0.72	0
	原材料生产	0.22	0.52	0.31	0.21	0.01
	水资源供给	-1.18	0.27	0.17	7.50	0.01
支持服务	土壤保持	0.47	2.10	1.33	0.84	0.07
	维持养分循环	0.14	0.16	0.10	0.06	0
	生物多样性	0.15	1.91	1.21	2.31	0.06
调节服务	气体调节	0.81	1.73	1.09	0.70	0.06
	气候调节	0.42	5.17	2.89	2.07	0.05
	净化环境	0.12	1.51	0.95	5.02	0.19
	水文调节	1.35	3.38	2.11	92.52	0.11
文化服务	美学景观	0.07	0.84	0.53	1.71	0.03

3 结果分析

3.1 府河湿地生态资产的供给格局

3.1.1 府河湿地生态资产的存量特征及变化

府河湿地的生态存量资产表现为有形的水、草、林等自然资源（表3）。其存量资产组合以水域生态系统为主，面积占46%以上，是河流湿地主要的空间表征；第二为草地生态资产，面积占比42%；其后依次为林地生态资产（约6%）、农田生态资产（约4%）以及荒漠生态资产（不足1%）。研究区生态存量资产综合指数由2015年的32.24增长为2021年的46.74，其中，水域和草地作为府河湿地的主体资源，生态存量资产指数显著提升，表现出面积略微减小但质量整体提升的趋势，草地生态资产优良以上级别占比由41%增长为73%，水域监测断面水质由V类提高为IV类。

表3 府河湿地生态存量资产测度结果
Table 3 The area and proportion of various ecosystems in Fuhe wetland

存量资产类型	面积/km ²		生态存量资产综合指数	
	2015年	2021年	2015年	2021年
农田	1.32	1.46	2.17	2.90
林地	2.24	1.91	1.88	1.45
草地	14.40	13.32	19.11	25.33
水域	15.68	14.73	9.08	17.06
荒漠	0.20	0.19	—	—

水域和草地作为府河湿地生态系统最主要的存量资产组合，呈现出广泛分布的空间格局，林地生态资产在研究区中游郊野公园段较为丰富，农田生态资产小范围集中在上游入武汉境段、中游府河郊野公园段以及下游淝口三角洲段，荒漠生态资产则在研究区中游段零星分布（图3）。

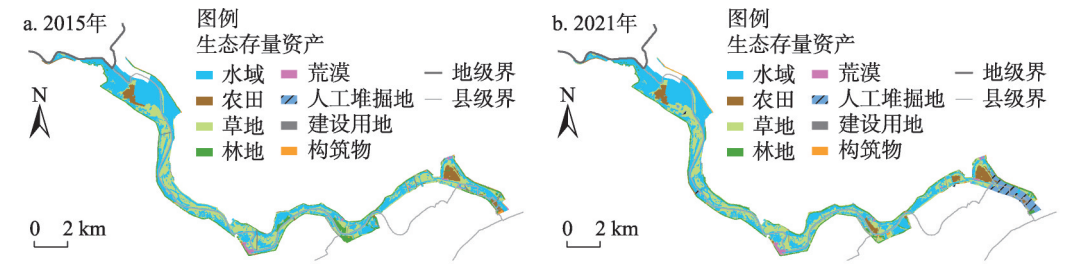


图3 府河湿地生态存量资产的空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of ecological stock assets in Fuhe wetland

3.1.2 府河湿地生态资产的流量特征及变化

府河湿地生态流量资产在2015—2021年间呈现出略微下降的发展趋势（表4）。基于当量因子法的测算结果，2021年研究区生态系统服务价值量为46983.70万元，其中，水域的价值最为显著，达到42318.88万元（占比90.07%）；其次分别为草地（7.81%）、林地（1.83%）、农田（0.28%）、荒漠（0.01%）。研究区依托于府河的河流水文优势，以充沛的水资源创造出了较高的生态价值，且林草茂盛的环境也为湿地生态系统增加了隐形

表4 府河湿地生态系统服务价值测度结果

Table 4 Measurement results of ecosystem service use value based on value equivalent factor method (万元)

生态 服务 类型	年份	供给服务			支持服务			调节服务				文化 服务	合计
		食物 生产	原材料 生产	水资源 供给	土壤 保持	维持养 分循环	生物 多样性	气体 调节	气候 调节	净化 环境	水文调节	美学 景观	
农田	2015	33.37	7.34	-39.37	15.68	4.67	5.00	27.03	14.01	4.00	45.04	2.34	119.11
	2021	36.90	8.12	-43.55	17.35	5.17	5.54	29.89	15.50	4.43	49.82	2.58	131.75
林地	2015	13.02	29.44	15.29	118.90	9.06	108.14	97.95	292.73	85.50	191.38	47.56	1008.97
	2021	11.10	25.11	13.04	101.39	7.72	92.21	83.52	249.60	72.90	163.18	40.55	860.33
草地	2015	76.44	112.84	61.88	484.10	36.40	440.42	396.75	1051.92	345.79	768.01	192.91	3967.46
	2021	70.70	104.37	57.24	447.80	33.67	407.39	366.99	973.03	319.85	710.41	178.44	3669.90
水域	2015	285.37	83.23	2972.56	332.93	23.78	915.55	277.44	820.43	1989.64	36669.54	677.74	45048.21
	2021	268.08	78.19	2792.47	312.76	22.34	860.08	260.63	770.72	1869.09	34447.85	636.68	42318.88
荒漠	2015	0	0.05	0.05	0.35	0	0.30	0.30	0.25	0.96	0.56	0.15	2.98
	2021	0	0.05	0.05	0.34	0	0.29	0.29	0.24	0.91	0.53	0.14	2.83
合计	2015	408.19	232.90	3010.41	951.97	73.91	1469.43	799.47	2179.34	2425.88	37674.53	920.71	50146.74
	2021	386.79	215.83	2819.24	879.62	68.90	1365.51	741.32	2009.09	2267.19	35371.80	858.41	46983.70

资产。对比2015年的价值量50146.74万元，研究区的变化主要表现在水域、林地、草地和荒漠价值略微降低，农田价值提高。价值功能方面，2021年研究区生态系统服务功能表现为调节服务>供给服务>支持服务>文化服务。具体到功能子项，水文调节功能最为显著（占比75.29%），其次为水资源供给（6.00%）、净化环境（4.83%）、气候调节（4.28%）、生物多样性（2.91%）。可见，调节服务始终是府河湿地生态系统的主要功能，其中水文调节的贡献度最大，而保持湿地面积是维系水文调节服务价值、乃至整个生态系统服务总价值的关键。与2015年相比，研究区各项子功能的重要程度排序未发生变化，但均出现了一定程度的价值量下降。

价值空间方面，研究区生态系统服务价值呈现出上游价值高，下游价值偏低，中游段大体以府河中心线向河堤逐渐递减的价值空间格局（图4）。其上游段紧邻武汉市边界，因水域面积广泛，集聚了较高价值的生态空间。从黄花涝古镇至浈口一带，价值空间呈现出差异化分布的态势，但基本吻合中心（湿地中心）价值高、外围（堤岸）价值低的特征。浈口以东的下游段，以农田和其他人工用地为主，其生态系统服务价值偏低，并在入江口处集聚了生态价值的低值空间。与2015年相比，2021年研究区下游段的

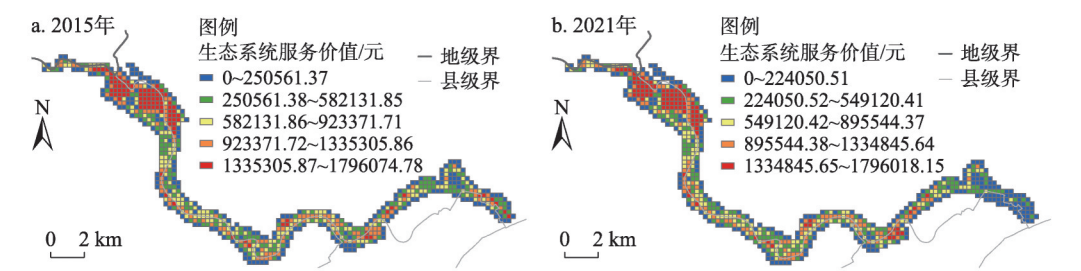


图4 府河湿地生态系统服务价值空间格局

Fig. 4 Spatial pattern of ecosystem service value in Fuhe wetland

价值量下降较为明显，中游段的府河郊野公园附近价值量有所提升，上下游价值空间供给不均衡现象略微加剧。

3.1.3 府河湿地生态资产供给变化原因

结合存量资产和流量资产的基本状况，府河湿地生态资产变化的原因主要在于水域、林地和草地面积的减少及其向种植土地、房屋建筑（区）、铁路与道路和人工堆掘地的转化（表5）。其中，水域面积转换0.95 km²，损失价值2729.32万元，占总损失的86.29%，并主要转换为了人工堆掘地。林地和草地在相互转换的基础上，部分转换为了种植土地，提升了12.63万元的农田价值；部分转换为人工堆掘地，损失了林、草用地的价值。一方面，该变化与城市生态工程项目密切相关。2019年武汉市开展长江大保护府河生态修复工程，2020年具体实施长江支流府河出口河段综合整治工程，项目在进行河道整治、堤防加固和生态景观营造的过程中，产生人工堆积的各种弃渣、沙土、岩屑等，由此形成了大面积的人工堆掘地，直观影响了研究区的流量资产供给；但与此同时，生态保护与恢复工程又促使府河湿地存量资产质量得到显著提升，有助于加剧因存量而产生的物质循环和能量流动等生态过程^[28]，这又为生态服务流的形成提供了发展潜能。另一方面，研究区独特的湿地景观特征催生了地表覆盖的动态变化。研究区属典型的河流湿地，受亚热带季风气候影响，河流枯水期和丰水期显著，各水期流量差异明显，使得研究区地表覆盖情况具有周期性淹没的重要特征，进而导致林地、草地、水域的相互转换较为频繁。

表5 2015—2021年府河湿地地表覆盖转移矩阵

Table 5 Land cover transfer matrix of Fuhe wetland from 2015 to 2021 (km²)

生态资产	水域	林地	草地	种植土地	房屋建筑(区)、铁路与道路	构筑物	人工堆掘地	荒漠和裸露地
水域	14.33	0.16	0.25	0	0.08	0	0.85	0
林地	0.01	1.35	0.48	0.19	0.06	0.01	0.14	0
草地	0.38	0.31	12.45	0.17	0.28	0.05	0.76	0
种植土地	0	0.03	0.08	1.11	0.01	0	0.09	0
房屋建筑(区)、铁路与道路	0.01	0.01	0.02	0	0.33	0	0.01	0
构筑物	0.01	0.04	0.03	0	0	0.12	0.05	0
人工堆掘地	0	0	0.02	0	0.01	0	0.05	0
荒漠和裸露地	0	0	0	0	0	0	0.02	0.19

因此，2015—2021年间，府河湿地作为衔接武汉临空经济区与长江新区两大经济集聚区的城市重要生态系统，在自然环境变化和生态工程的作用下表现出较为明显的资产空间变化，其生态资产的价值显化与动迁过程突破了自然刚性条件的约束，加速了因存量而生的生态服务流的交互过程，凸显出人类活动在生态系统价值研究中的必要性^[29]。其上游段生态流量资产价值量较高，存量资产以水、草、林地为主，近年来总资产变化幅度不大；而下游段生态流量资产价值量整体较小并出现降低态势，存量资产由水、草、农田转换为人工堆掘地为主；进而导致上下游资产供给不均衡现象加剧。

3.2 府河湿地生态资产的需求测度

为进一步评估府河湿地生态资产的人类需求情况，本文采用武汉市联通手机信令数

据,以府河湿地为目的地,分析居民游憩行为的空间特征,以此衡量府河湿地生态系统的需求水平。考虑样本的可获取性及代表性,时间节点选取2017年6月18日(周末)、2019年6月13日(周四)和2019年6月15日(周六)三日样本。通过匹配起讫点(O/D)筛选样本信息,构建250 m×250 m的空间格网基本分析单元,并按照1000 m为间隔建立缓冲区,统计每个缓冲区环内的O/D点数。

结果表明,居民对府河湿地的生态游憩需求提升,数量上表现为单日客流量增长显著,空间上表现为由研究区中游向上、下游拓展的趋势。研究区单日客流量由2017年的1.89万人次增长为2019年的2.85万人次,在此过程中,府河湿地中游段始终为居民游憩出行的最多选择;但近年来,出行覆盖范围逐渐拓展,上游段人流量有所增加,且下游潞口三角洲出现新的游憩集聚点(图5)。

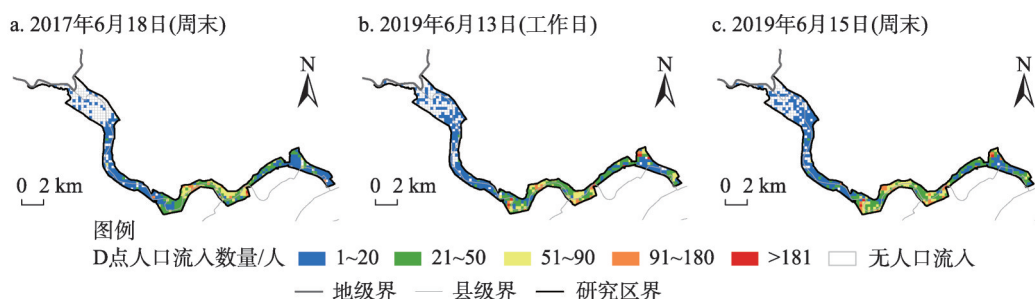


图5 府河湿地游憩目的地统计

Fig. 5 Recreation destination of Fuhe wetland

伴随生态需求的提升,游憩人口出行范围也在不断外拓,府河湿地生态系统的产品与服务吸引到了更远区域的人群。2017年府河湿地的市内客源地明显集聚在府河左岸及中游地段;发展到2019年,其客源地范围由左岸向右岸拓展、从中游向中下游延伸(图6)。武汉市外,客源地由2017年的24个国内省市区,增加至2019年的30个国内省市区及8个其他国家,覆盖面达到80余个城市。表明府河湿地对外的吸引范围不断扩张,其内含的生态系统服务流在更大尺度、更远距离实现了要素流动,人地耦合范围得以不断扩张。

生态游憩出行范围不仅呈现出显著的负幂衰减规律,也因周内闲暇时间约束而异。通过构建出行人流与距离相关的函数曲线方程,发现在不同时间节点,研究区O/D点样本与距离之间拟合幂函数 R^2 均达到0.7左右,拟合度较高,证明居民对府河湿地的游憩需求符合距离衰减函数,具备负幂衰减规律特征(表6、图7)。结论在一定程度上回应了已有研究提出的价值的空间贴现问题^[30],由于生态系统服务价值在流动过程中会随着空间距离的增加呈现出逐渐衰减的变化^[31],其服务能力弱化进而导致居民需求减弱。对比2019年同一周工作日与周末的数据,工作日距离衰减系数 β 值偏大,表明工作日客流辐射范围更小且分布更为集中。这与居民的商圈惠顾等休闲行为具有一定的相似性^[32]。主要原因在于,工作日游憩行为与通勤行为存在相互制约的关系,居民闲暇时间相对较少而其可承受的距离成本较低。

3.3 府河湿地生态资产变化的人地关系启示

对比生态资产供给与需求特征(图3~图5),判断研究区人地之间供需互动的发展趋

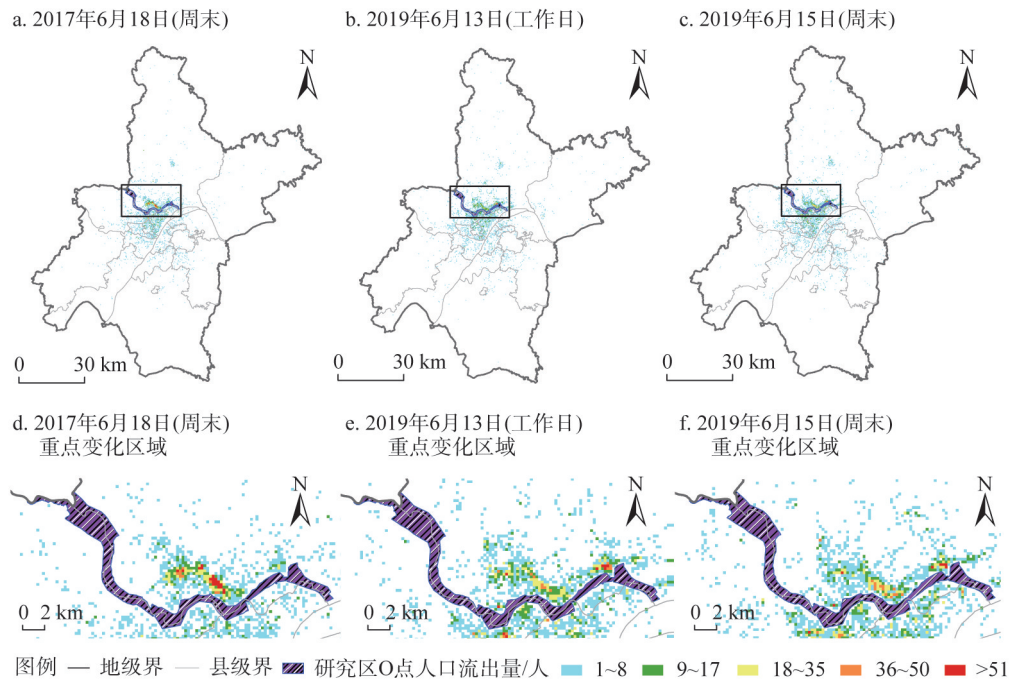


图6 府河湿地游憩出行地的市内分布格局
Fig. 6 Recreation origin to Fuhu wetland, inside Wuhan

表6 不同时间距离衰减模型的参数对比

Table 6 Coefficient comparison of different time distance decay models

日期	2019年6月13日(工作日)	2019年6月15日(周末)	2017年6月18日(周末)
距离衰减系数 β	2.058	2.018	2.062
R^2	0.749	0.756	0.610

势。结果显示，府河湿地上游段生态资产价值量相对较高，但居民出行选择的概率始终偏低，表明上游段生态价值转化路径受阻，居民较难从生态系统中直接获益；研究区中游段供需空间相对均衡；研究区下游段生态资产价值量出现降低的态势，但在生态工程的作用下，其地表覆盖类型部分由水、草、农田转换为人工堆掘地，游憩客流量不减反增。可见，府河湿地生态资产供给与居民生态游憩需求目前尚处于不均衡的状态，但生态工程建设明显有利于提升生态资产的价值转化通道。

根据实地调研情况，进一步解析其供需互动变化原因。研究区上游段自然滩涂范围广，开发建设力度小。虽然2016年武汉市针对东西湖区柏泉片区，提出“零围墙”纯生

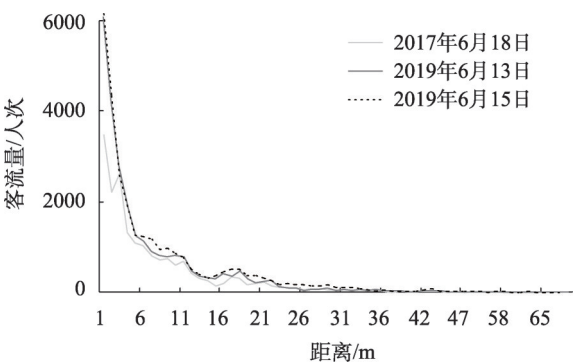


图7 不同时期府河湿地客流量与距离分布关系
Fig. 7 The relationship between customer volume and distance distribution in Fuhu wetland in different periods

态公园的规划概念,将府河湿地上游段的野生鸟类观景点纳入了建设范围,希望能吸引爱鸟人士参观及科普教育类活动的举办;但规划落地后相应的配套设施尚未匹配,交通出行及游玩功能并不健全,一定程度上阻碍了该区域的可持续发展,进而导致研究区上游段生态资产效用没有得到充分发挥。相较而言,研究区中游段的府河郊野公园于2014年启动建设,以郊野休闲为特色,由垃圾填埋场成功改造为绿化园区,在2016年开园后广泛吸引了周边居民入园锻炼踏青,有效激活了该片区的生态资源价值,实现了人地供需互动的相对均衡。而府河湿地下游段,受长江新区起步区规划建设促进,近两年正全力打造江滩生态公园。其范围囊括朱家河河口至新河河口,将防汛道路和自然滩涂结合打造为景观廊道,填补了主城区内自然郊野型江滩公园的空白。在此背景下,虽然生态工程建设所导致的用地类型变更,直接影响了下游段生态流量资产的价值,但郊野公园、城市碧道等的建设本质上推动了自然滩涂向休闲游憩空间的转化,有效促进存量资产的质量提升,进而间接提高了流量资产的价值转化潜力;加之该区域毗邻市区、基础设施完善,共同促使下游段的游憩吸引力持续增加,出现了供不应求的可能性。

可见,在供需框架下,生态资产有效链接了自然生态系统(生物物理过程)和社会经济系统(人类福祉),既关注到自然资本和生态系统服务所产生的资产供给,同时重视人类从自然中获得惠益的生态需求。供需关系作为自然系统和人类系统交互作用的基本途径,其高阶的表现形式实际上就是耦合(coupling),耦合关系多通过资本流、非线性反馈、权衡博弈、可得性差异等方式形成供需联结^[33]。因此,城市空间生态资产在供给—需求的互动模式下,本质上实现了城市生态系统的人地耦合关系的表达。这一结论吻合已有研究关于城市生态系统人与自然的相互作用机制分析^[34],即城市生态系统不仅存在组分上的镶嵌(自然要素与人工构筑物),更表现出过程上的耦合(自然过程与人文过程)。

城市生态系统人地关系的过程耦合,不仅体现在人地系统的内部耦合层面,更通过跨区域的资源流动,为人地系统远程耦合提供了一定的经验参考^[33]。依托人口流动的载体,府河湿地生态系统产品与服务的吸引范围由研究区毗邻地区向市内远郊区拓展、从武汉市内向武汉市外扩张,形成了远距离生态—人类活动相互作用的发展趋势。即孝感市、黄冈市等武汉城市圈范围,安徽省、河南省、江西省等附近省份,不再完全依赖当地环境提供的生态系统服务,而越来越多地消费更远区域(武汉市府河湿地)的环境资源。在此背景下,府河湿地超出其作为“武汉后花园”空间资产的城市内部性,拓展了人地系统耦合的空间尺度,为武汉都市圈“西北翼”及更广阔的区域创设了交互共享场景。这种远端相互作用与内部耦合的结合,促使生态资产研究由城市内部供需矛盾迈向跨区域的资源环境问题,建构了新时期府河湿地生态系统的人地耦合模式。一定程度上响应了马恩朴等^[35]对远距离人类与自然耦合系统相互作用的界定,认同“不断强化的区域联系和日益加速的要素流动逐步将基于当地生态系统服务的乡村社会转变为以非生态系统服务和远距离资源调度为基础的城市社会,并深刻重塑了人类与自然的互动方式。”

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) 湿地系统作为水陆之间的过渡性地带,通过其特殊的生态系统结构、过程和功能运转,有助于丰富城市空间资产的生态价值供给。2015—2021年府河湿地生态存

量资产综合指数由 32.24 增长为 46.74,生态流量资产由 50146.74 万元略微下降为 46983.70 万元,整体上资产质量提升、价值总量较高;在生态工程的主要作用下,资产供给空间发生了较为明显的变化,并呈现出上下游供给相对不均衡的格局特征。研究区依托充沛的水、草、林等生态存量资产,在水文调节、水资源供给、净化环境、气候调节、生物多样性等多方面提供了重要的生态系统服务与功能,发挥了湿地系统在保障人类和环境的健康和福祉安全的有益作用。

(2) 人类活动在生态系统价值研究中的必要性凸显,人类从自然中获得惠益的生态系统价值需求存在空间异质性与时间差异特征。近年来居民对府河湿地的生态游憩需求提升,数量上表现为单日客流量增长显著,空间上表现为由研究区中游向上、下游拓展的趋势。伴随生态需求的提升,游憩人口出行范围不断外拓,府河湿地生态系统的产品与服务吸引到了更远区域的人群。这一吸引范围不仅呈现出显著的负幂衰减规律,也因周内闲暇时间约束而异。

(3) 城市空间生态资产基于供给—需求的交互作用,实现了不同层次和尺度下人—地耦合关系的表达。一方面,生态游憩需求显著增加与生态资产供给小幅度下降,加剧了城市生态系统内部的供需不均衡格局,尚需优化生态系统资源结构,进一步激活生态存量及流量资产的价值转化力度,保障人地系统内部的耦合稳定;另一方面,依托人口流动的载体,府河湿地生态系统产品与服务的吸引范围由研究区毗邻地区向市内远郊区拓展、从武汉市内向武汉市外扩张,形成了远距离生态—人类活动相互作用的发展趋势,体现了生态资源跨边界的流动以及生态价值跨区域的效应,拓展了人地系统耦合的空间尺度。这种远端相互作用与内部耦合的结合,构成了新时期府河湿地生态系统的人地耦合模式。

4.2 讨论

在可持续发展的时代主题下,在地理学研究向人地系统耦合深化的过程中,生态系统产品服务与人类福祉愈发紧密交互关联,自然生态系统与社会经济系统的相互关联、耦合已成为当前研究的前沿问题。本文以府河湿地生态系统为例,搭建了城市空间生态资产的研究框架,初步解析了生态系统资产价值化所蕴含的人地关系问题。面对复杂的人地系统结构,未来有必要继续关注以下问题:(1) 进一步优化供需关系的评判标准。供需关系是人地交互作用的基本途径,目前需求侧的研究相对缺乏。本文关注到需求偏好的地域性分异和时序性变化,选用个体出行的微观数据以展开实证研究,尚需进一步关注个体主观意愿及利益相关者的角色差异,完善需求侧的综合评估;(2) 为生态系统可持续发展与决策管理提供应用支撑。本文评估了城市局域生态系统的内部供需状态与远端耦合趋势,尚需进一步解析近远程耦合的动力机制并诊断动态耦合过程中的风险,以此帮助管理者寻求生态系统服务的最佳配置,实现生态系统可持续发展的优化管理。

参考文献(References):

- [1] World Bank Group. World Development Report 2003: Sustainable Development in a Dynamic World. Washington D. C.: World Bank Group, 2003: 13-35.
- [2] 董筱丹,顾善松,李彦敏. 制度激励与可持续发展:《2003年世界发展报告》书评. 管理世界, 2004, (5): 149-150, 153. [DONG X D, GU S S, LI Y M. Institutional incentives and sustainable development: Book review of World Development Report 2003. Journal of Management World, 2004, (5): 149-150, 153.]
- [3] 易家林,郭杰,林津,等. 生态文明理念下的国土空间均衡:基于两种财富的分析框架. 地理研究, 2022, 41(4): 945-

959. [YI J L, GUO J, LIN J, et al. Territorial spatial equilibrium under the concept of ecological civilization: An analytical framework based on two kinds of wealth. *Geographical Research*, 2022, 41(4): 945-959.]
- [4] EHRLICH P R, KAREIVA P M, DAILY G C. Securing natural capital and expanding equity to rescale civilization. *Nature*, 2012, 486: 68-73.
- [5] 高吉喜. 区域生态资产评估: 理论、方法与应用. 北京: 科学出版社, 2013. [GAO J X. *Regional Ecological Assets Evaluation: Theory, Method and Application*. Beijing: Science Press, 2013.]
- [6] COSTANZA R, DALY H E. Natural capital and sustainable development. *Conservation Biology*, 1992, 6(1): 37-46.
- [7] COSTANZA R, DE GROOT R, BRAAT L, et al. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go?. *Ecosystem Services*, 2017, 28: 1-16.
- [8] 刘焱序, 傅伯杰, 赵文武, 等. 生态资产核算与生态系统服务评估: 概念交汇与重点方向. *生态学报*, 2018, 38(23): 8267-8276. [LIU Y X, FU B J, ZHAO W W, et al. Ecological asset accounting and ecosystem services evaluation: Concept intersection and key research priorities. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(23): 8267-8276.]
- [9] 于贵瑞, 杨萌. 自然生态价值、生态资产管理及价值实现的生态经济学基础研究: 科学概念、基础理论及实现途径. *应用生态学报*, 2022, 33(5): 1153-1165. [YU G R, YANG M. Ecological economics foundation research on ecological values, ecological asset management, and value realization: Scientific concepts, basic theories, and realization paths. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(5): 1153-1165.]
- [10] 杨文杰, 巩前文, 林震. 北京市生态涵养区生态资产时空格局及驱动因素. *生态学报*, 2021, 41(15): 6051-6063. [YANG W J, GONG Q W, LIN Z. Spatio-temporal patterns and driving factors of ecological assets in Beijing's ecological conservation area. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(15): 6051-6063.]
- [11] 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. [HU Q Y, CHEN S L. Optimizing the ecological networks based on the supply and demand of ecosystem services in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou Region. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(2): 342-355.]
- [12] 李佳慧, 黄麟, 曹巍. 中国县域生态资产损益的影响机制及优化提升路径. *地理学报*, 2022, 77(5): 1260-1274. [LI J H, HUANG L, CAO W. The influencing mechanism of ecological asset gains and losses at the county level in China and its optimization and promotion paths. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(5): 1260-1274.]
- [13] 韩增林, 赵玉青, 闫晓露, 等. 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. [HAN Z L, ZHAO Y Q, YAN X L, et al. Coupling coordination mechanism and spatial-temporal relationship between gross ecosystem product and regional economy: A case study of Dalian. *Economic Geography*, 2020, 40(10): 1-10.]
- [14] 李文青, 赵雪雁, 杜昱璇, 等. 秦巴山区生态系统服务与居民福祉耦合关系的时空变化. *自然资源学报*, 2021, 36(10): 2522-2540. [LI W Q, ZHAO X Y, DU Y X, et al. Spatio-temporal changes of the coupling relationship between ecosystem services and residents' well-being in Qinba Mountains Area. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(10): 2522-2540.]
- [15] 白杨, 李晖, 王晓媛, 等. 云南省生态资产与生态系统生产总值核算体系研究. *自然资源学报*, 2017, 32(7): 1100-1112. [BAI Y, LI H, WANG X Y, et al. Evaluating natural resource assets and gross ecosystem products using ecological accounting system: A case study in Yunnan province. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(7): 1100-1112.]
- [16] 咎欣, 张玉玲, 贾晓宇, 等. 永定河上游流域水生态系统服务价值评估. *自然资源学报*, 2020, 35(6): 1326-1337. [ZAN X, ZHANG Y L, JIA X Y, et al. Evaluation on the ecosystem services value of the upper reaches of Yongding River. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(6): 1326-1337.]
- [17] 李鹏辉, 张茹倩, 徐丽萍. 基于生态足迹的土地资源资产负债核算. *自然资源学报*, 2022, 37(1): 149-165. [LI P H, ZHANG R Q, XU L P. Research on land resource asset and liability accounting based on ecological footprint. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(1): 149-165.]
- [18] 顾丹丹, 彭鹏, 赵椿溪, 等. 纳入健康损失的生态补偿额度测算: 基于省域尺度. *经济地理*, 2021, 41(9): 193-203. [GU D D, PENG P, ZHAO C X, et al. Calculation of eco-compensation standard included health loss: Based on provincial level. *Economic Geography*, 2021, 41(9): 193-203.]
- [19] 刘有延. 草地生态资产与生态系统服务概念与特征. *草业科学*, 2022, 39(4): 795-805. [LIU Y Y. Differentiation and analyses of the concepts and characteristics of ecological assets and ecosystem services of grasslands. *Pratacultural Sci-*

- ence, 2022, 39(4): 795-805.]
- [20] 王辉, 宋长春. 三江平原湿地生态风险评价研究. 地理科学进展, 2019, 38(6): 872-882. [WANG H, SONG C C. Regional ecological risk assessment of wetlands in the Sanjiang Plain. Progress in Geography, 2019, 38(6): 872-882.]
- [21] 肖武, 张文凯, 吕雪娇, 等. 西部生态脆弱区矿山不同开采强度下生态系统服务时空变化: 以神府矿区为例. 自然资源学报, 2020, 35(1): 68-81. [XIAO W, ZHANG W K, LYU X J, et al. Spatio-temporal patterns of ecological capital under different mining intensities in an ecologically fragile mining area in Western China: A case study of Shenfu Mining Area. Journal of Natural Resources, 2020, 35(1): 68-81.]
- [22] 范育鹏, 方创琳. 生态城市与人地关系. 生态学报, 2022, 42(11): 4313-4323. [FAN Y P, FANG C L. Eco-city and man-land relationship. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(11): 4313-4323.]
- [23] 赵文武, 刘月, 冯强, 等. 人地系统耦合框架下的生态系统服务. 地理科学进展, 2018, 37(1): 139-151. [ZHAO WW, LIU Y, FENG Q, et al. Ecosystem services for coupled human and environment systems. Progress in Geography, 2018, 37(1): 139-151.]
- [24] 张籍, 郭冻, 宋昌素, 等. 青藏高原地区生态资产核算研究: 以西藏自治区山南市为例. 生态学报, 2021, 41(22): 9095-9102. [ZHANG J, GUO L, SONG C S, et al. Assessment of ecosystem assets in Qinghai-Tibet Plateau: A case study of Shannan city. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(22): 9095-9102.]
- [25] HUANG B B, LI R N, DING Z W, et al. A new remote-sensing-based indicator for integrating quantity and quality attributes to assess the dynamics of ecosystem assets. Global Ecology and Conservation, 2020, 22: e00999, Doi: 10.1016/j.gecco.2020.e00999.
- [26] COSTANZA R, ARGE R, GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 386: 253-260.
- [27] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254. [XIE G D, ZHANG C X, ZHANG L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area. Journal of Natural Resources, 2015, 30(8): 1243-1254.]
- [28] 刘焱序, 傅伯杰, 赵文武, 等. 生态资产核算与生态系统服务评估: 概念交汇与重点方向. 生态学报, 2018, 38(23): 8267-8276. [LIU Y X, FU B J, ZHAO W W, et al. Ecological asset accounting and ecosystem services evaluation: Concept intersection and key research priorities. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(23): 8267-8276.]
- [29] LOCATELLI B, IMBACH P, WUNDER S. Synergies and tradeoffs between ecosystem services in Costa Rica. Environmental Conservation, 2014, 41(1): 27-36.
- [30] 魏强, 席增雷, 苏寒云, 等. 曹妃甸滨海湿地生态系统支持服务价值空间分异研究. 地理科学, 2021, 41(5): 890-899. [WEI Q, XI Z L, SU H Y, et al. Spatial differentiation of supporting service value of coastal wetland ecosystem in the Caofeidian district of Tangshan in Hebei province. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(5): 890-899.]
- [31] ZIA A, NORTON B G, METCALF S S, et al. Spatial discounting, place attachment, and environmental concern: Toward an ambit-based theory of sense of place. Journal of Environmental Psychology, 2014, 40: 283-295.
- [32] 岳丽莹, 李山, 李开明, 等. 商圈惠顾行为的空间衰减: 幂律模式还是指数模式. 地理科学, 2021, 41(3): 446-453. [YUE L Y, LI S, LI K M, et al. The spatial decay of patronizing behavior in trade areas: Power law or exponential law. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(3): 446-453.]
- [33] 邱坚坚, 刘毅华, 袁利, 等. 人地系统耦合下生态系统服务与人类福祉关系研究进展与展望. 地理科学进展, 2021, 40(6): 1060-1072. [QIU J J, LIU Y H, YUAN L, et al. Research progress and prospect of the interrelationship between ecosystem services and human well-being in the context of coupled human and natural system. Progress in Geography, 2021, 40(6): 1060-1072.]
- [34] 王效科, 苏跃波, 任玉芬, 等. 城市生态系统: 人与自然复合. 生态学报, 2020, 40(15): 5093-5102. [WANG X K, SU Y B, REN Y F, et al. Urban ecosystem: Human and nature compounding. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(15): 5093-5102.]
- [35] 马恩朴, 蔡建明, 韩燕, 等. 人地系统远程耦合的研究进展与展望. 地理科学进展, 2020, 39(2): 310-326. [MA E P, CAI J M, HAN Y, et al. Research progress and prospect of telecoupling of human-earth system. Progress in Geography, 2020, 39(2): 310-326.]

The evaluation of urban spatial ecosystem assets and human-land relationship: A case study of Fuhe wetland in Wuhan city

GAN Yi-lin^{1,2}, LUO Jing^{1,2}, ZHU Yuan-yuan^{1,2}, LUO Ming-hai³, TIAN Ling-ling^{1,2}

(1. Hubei Provincial Key Laboratory for Geographical Process Analysis and Simulation & College of Urban and Environmental Sciences, Central China Normal University, Wuhan 430079, China; 2. Hubei High-quality Development Research Institute, Research Office of Hubei Provincial People's Government & Central China Normal University, Wuhan 430079, China; 3. Wuhan Geomatics Institute, Wuhan 430022, China)

Abstract: The research on urban spatial assets considering ecosystem is of great significance for quantifying ecological assets and regulating urban human-land relationship. Taking Wuhan Fuhe wetland as an example, this study analyzed the change of ecosystem assets and human-land relationship by constructing the evaluation framework of urban spatial ecosystem assets. The results show that: (1) From 2015 to 2021, the Fuhe wetland enriched the supply of ecological wealth of urban spatial assets. Under the effect of ecological engineering, the quality of stock assets improved, the total amount of flow assets was high, and the supply of upstream and downstream assets was comparatively uneven. (2) The increased demand for ecological recreation among residents manifested as quantity growth and space expansion. Meanwhile, the demand space had the characteristics of distance decay and leisure time constraint. (3) Although the supply and demand in the internal system were out of balance, this system generated a long-term interaction between ecological and human activities, which expanded the spatial scale of the coupled human and environment system. The combination of remote interaction and internal coupling constituted the human-land coupling model of urban spatial ecosystem in the new era. The research results can provide some reference for the systematic quantification of urban spatial ecosystem assets, and a scientific basis for promoting the coordination and balance of ecosystem services and human welfare.

Keywords: ecosystem assets; urban ecosystem; human-land relationship; Fuhe wetland