

DOI: 10.20103/j.stxb.202209242726

赵海霞, 顾斌杰, 王俊淇, 范金鼎, 李欣. 绿色基础设施供需适配关系演进特征及其规律——以南京市为例. 生态学报, 2024, 44(2): 463-475.

Zhao H X, Gu B J, Wang J Q, Fan J D, Li X. Characteristics of green infrastructure supply-demand adaptation relationship and its pattern in Nanjing City. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(2): 463-475.

绿色基础设施供需适配关系演进特征及其规律 ——以南京市为例

赵海霞^{1,*}, 顾斌杰^{1,2}, 王俊淇¹, 范金鼎^{1,3}, 李欣^{1,2}

1 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008

2 中国科学院大学南京学院, 南京 211135

3 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009

摘要: 绿色基础设施 (GI) 供需均衡对维护城市或区域生态系统稳定, 提升国土空间治理体系和治理能力现代化水平, 推动城市高质量发展具有重要意义。从绿色基础设施供需适配关系的视角出发, 运用生态系统服务价值法对 GI 服务供给进行测度, 从社会、经济、生态和环境四方面综合评价 GI 需求, 研究南京市 GI 供需适配关系的演进情势, 揭示其时空配置的差异性。结果表明: (1) 2000—2020 年, 南京市 GI 供给呈主城低、郊区高的分布格局, 总供给、人均供给和单项供给均先减后增。 (2) GI 总需求逐年减少, 形成从中心城区向郊区递减的三个圈层。 (3) 南京市共划出 9 个供需适配类型, 对应 11 个辖区划出 99 个供需适配类型组合区, 供需适配较好区与较差区分别占全市国土面积的 26% 和 44%, 呈不均分布。 (4) 主城区较适应的匹配类型是低供给-中需求, 郊区维持低供给-低需求较符合区域发展实际, 并针对不同类型区优化提升提出对策建议。

关键词: 绿色基础设施; 供需测度; 适配关系; 空间分异; 南京市

Characteristics of green infrastructure supply-demand adaptation relationship and its pattern in Nanjing City

ZHAO Haixia^{1,*}, GU Binjie^{1,2}, WANG Junqi¹, FAN Jinding^{1,3}, LI Xin^{1,2}

1 Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

2 Nanjing College, University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China

3 School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China

Abstract: Green infrastructure (GI), as an instrumental part of the urban infrastructure system, is an effective tool for urban planners to deal with climate change and eco-environmental issues. Green is considered the natural environment, while infrastructure is socially and technologically characterized, and thus GI is constructed. However, there is an imbalance between supply and demand in the irrational construction process of GI supply and demand. Accordingly, we present the concept of GI supply-demand adaptation relationship. GI supply-demand adaptation relationship refers to the degree of satisfaction, mutual adaptation and fit level of natural, semi-natural elements or ecosystems that performs functions for people's production, living and ecological needs within a specifically spatial neighborhood. From the perspective of GI supply and demand adaptation relationship, the ecosystem service value method is applied to measure the GI service supply and evaluate the GI demand in four aspects, including social, economic, ecological, and environmental aspects, to study the evolution of GI supply and demand adaptation relationship in Nanjing and reveal the differences in its spatial and

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (42371318)

收稿日期: 2022-09-24; 网络出版日期: 2023-10-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hxzhao@niglas.ac.cn

temporal allocation. The results show that GI supply in Nanjing is low in the main city and high in the suburbs. This was with total supply, per capita supply, and individual supply decreasing first and then increasing from 2000 to 2020. The overall demand of GI in Nanjing was decreasing year by year. The economic demand and ecological demand among the sub-demands were decreasing, and the social demand increased. The spatial distribution of GI demand showed a circle characteristic of high center and low periphery. In order to reveal the spatial correlation characteristics of GI supply and demand, the concept of dissipative structure principle about the decrease of disorder and increase of order of open system and the theory of geographical differentiation are used to classify the degree of supply and demand fitness into types with hierarchical differences. There are 9 types of supply and demand adaptation in Nanjing, and 99 combination zones of supply and demand adaptation in 11 jurisdictions. The better and less suitable supply and demand adaptation zones account for 26% and 44% of the city's land area, respectively, which are unevenly distributed. Urban areas are best suited to low supply-medium demand, whereas suburban areas maintain low supply-low demand. In view of the heterogeneity and orderliness of the spatial allocation of supply and demand of each type in the municipal districts, the initiative of upgrading the quality of the stock and optimizing the structure of the increment is proposed.

Key Words: green infrastructure; measurement of supply and demand; adaptation relationship; spatial heterogeneity; Nanjing

绿色基础设施(GI)是由自然、半自然区域和开敞空间组成,具有内部连接性的绿色空间要素网络,在城市区域范围内提供生态、社会与经济等多种复合服务功能^[1-2]。GI具有调节生态环境、提升景观美学、提高健康福祉等效应^[3-4],因此,其建设能够为城市高质量发展注入绿色新动能,是引领人与自然和谐共生的中国式现代化的重要路径^[5]。由于城镇化进程过快,持续膨胀的城市人口和无序扩张的建设用地造成人地冲突加剧、供需矛盾突出,产生环境质量明显下降、自然空间生态功能受损、城市交通拥堵等一系列城市问题^[6-8]。在国家生态文明建设的背景下,GI营建与修复在新型城镇化进程中起到改善城市问题的作用,为生态城市、森林城市、园林城市建设提供了坚实基础,对维护城市生态安全发挥重要作用。我国城市化地区GI建设虽然取得了明显的进展,但仍存在一些突出问题,具体表现为:一是GI建设缺乏全域统筹与系统考虑,侧重于“见缝插绿、留白增绿”等形式,对自然生态斑块破碎化的改善作用有限,大量生境斑块对GI连通性提高的贡献较低^[9-10],此外,科学规划的缺乏造成主城区与郊区过渡连通体系缺少、空间优化手段有限等问题^[11];二是GI的供需空间适配度偏低,如老城区受空间等方面限制缺绿明显,造成GI供给不能满足社会经济系统需求。

GI是一个服务于生态、环境、社会和经济健康的生态学框架——自然生命支持系统^[12]。GI供需适配关系研究是基于大量关于GI效应的研究。目前,诸多研究聚焦于GI对生态环境质量改善及对城市社会经济价值提升的绩效评估^[13-14]。作为生态系统服务的空间落实途径^[15],GI最重要的目标是保护自然系统,通过调节气候温度^[16-17]、改善空气质量^[18]、提升雨洪调节能力^[19]以及保护生物多样性^[20]等多重功能,GI产生巨大的生态和环境效益。同时,GI还包括更为多样性的目标,通过保护和连接分散的绿地,改善周围环境,引起人们生理、情感和认知过程的变化^[21],在改善身体健康^[22]、调节心理状态^[23]、降低城市犯罪^[1]、提供科学文化教育^[24]等方面发挥重要作用。此外,GI对城市经济发展的影响同样不可忽视,通过节约资金成本^[25]、减少能耗^[26]以及增加土地和房地产价值^[27]等途径为城市带来一定的经济效益。虽然GI的多重效应已得到广泛证实,但当前研究仍以单要素或单方面效应评价为主,少量综合功能评价研究尚处于探索阶段^[28],而且难以判断GI提供效应的空间公平性^[29-30]。因此,融合经济学视角,从供给与需求两方面评价,从多元化效应角度研究GI供需关系可以重新审视GI的空间适配程度。

GI供需适配关系对生态系统和人类社会发展的影响至关重要。相关研究多从GI供给角度出发探讨,对于受益群体的需求关注度仍显不足,成为目前城市建设中GI郊区成片建设、主城破碎化的重要原因^[31]。也有研究认为目前GI研究与实践是以城市地区和生态系统服务为重点,对社会和经济的重视程度有限^[32],忽

略了环境、生态、经济与社会的多重效应供需空间分布密度相适应的原则^[9],尤其缺乏科学的理论支撑。关于 GI 供需关系的理论、供给和需求相适应的空间表达、异质性的辨识、分类或分区的依据等研究目前尚显薄弱^[33]。为了紧跟现代化城市建设的要求,遵循人与自然和谐共生的理念及地域空间分异原理,本文提出对 GI 供需空间适配关系表达的理解:在特定的空间范围内,自然、半自然要素或生态系统为人们生产生活生态需要提供服务功能的满足程度、相互适应与契合水平。

本文将我国特大城市之一的南京作为研究区,主要研究 2000 年、2010 年和 2020 年三个时段 GI 供需关系的时空变化特征,供需适配类型组合分区原则与依据,从全市与辖区两个维度,分析空间异质性和有序性,并根据不同需求主体提出优化路径,为 GI 供需关系研究提供地理学与生态系统科学等交叉研究的新视角,以期作为城市生态建设、生态修复保护工程配置以及管控能力提升的理论依据。

1 研究区概况

南京古称金陵,是江苏省会、南京都市圈的核心城市、长三角地区特大城市、长江经济带与沿海经济带交汇的重要节点城市,地处北纬 31°14'—32°37',东经 118°22'—119°14'(图 1)。全市总面积 6587.02 km²,建成区面积 868.28 km²,下辖 11 个行政区。到 2021 年末,南京常住人口 942.34 万人,城镇人口 818.89 万人,城镇化率 86.9%。全市地区生产总值 16355.32 亿元,产业结构为 2.00:35.19:62.81。以低山缓岗为主,占全市土地总面积 60.8%,平原、洼地及河流湖泊占 39.2%;林木覆盖率 31.3%,建成区绿化覆盖率 45.16%,是中国四大园林城市之一。

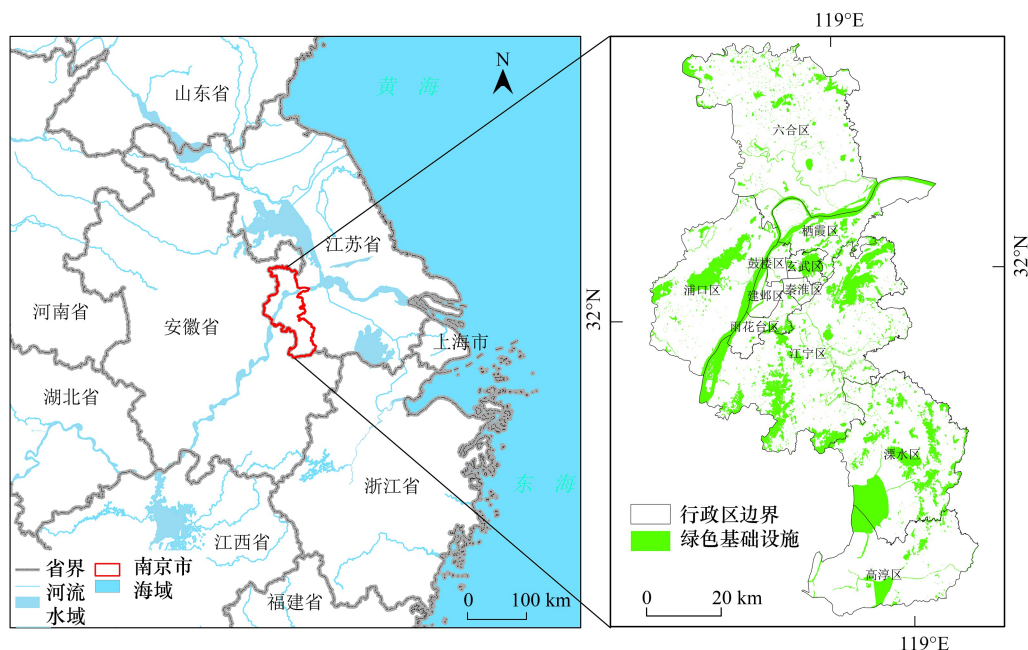


图 1 南京市区域位置与范围

Fig.1 Location and scope of the study area

2 研究方法数据来源

2.1 数据来源与处理

绿色空间、生态空间等概念与绿色基础设施(GI)的概念既存在区别,又具有联系。其中,绿色空间在广义上既可以是公园、廊道和自然保护区等已开发的具体场所,也可以是待人工利用的绿地^[34];生态空间是除城镇生活空间和农业农村生产空间以外,具有自然保护、休闲娱乐等功能的地域^[35]。而 GI 由网络中心、生态

廊道和小型斑块等要素构成,区别于绿色空间和生态空间更关注于空间之间的连通性^[36]。从土地利用角度来看,一般来说绿色空间包括林地、草地和耕地,但是由于耕地是以经济生产为核心目的^[35],不宜纳入 GI 范畴。而水域作为联通绿地的重要空间应该也纳入 GI 范畴。因此,GI 数据来源于全球地理信息公共产品 GlobeLand30(<http://www.globallandcover.com/>),分别选取 2000、2010 和 2020 年南京市的林地、草地和水域面积数据,分别从供给服务、调解服务、支持服务、文化服务 4 个大类 11 个小类对 GI 供给量值进行测算,运用 ArcGIS 10.5 软件,构建南京市 1km×1km 格网。

需求测度涉及数据主要包括社会、经济、生态及环境四个方面。人口密度采用人口网格数据,主要来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>),2020 年数据采用 2019 年手机信令和第七次人口普查数据进行推算;建筑密度采用 1km×1km 格网计算,建筑面积来源于《南京市房地产年鉴》和水经注信息服务平台(<http://www.zkyq-tech.cn/>)。夜间灯光数据来源于美国国家环境信息中心(<https://ngdc.noaa.gov/>),经相互校正、连续性校正、影像合成、去噪等处理;土地开发强度采用各区建设用地面积占全区的比例,其中建设用地面积来源于 GlobeLand30 土地利用现状。碳排放使用的能源数据来源于江苏省环境统计资料和历年《南京市统计年鉴》;破碎化指数根据单元内 GI 的数量及其面积的比例关系进行表征。地表温度利用地理数据空间云(<https://www.gscloud.cn/>)的 2000—2020 年 Landsat 系列数据,运用大气校正法,在 Envi 5.3 软件中进行反演;PM_{2.5}来源于美国宇航局地球观测数据和信息系统中社会经济数据和应用中心(<https://sedac.ciesin.columbia.edu/>)的全球年度 PM_{2.5}网络数据。

2.2 GI 供给指标选取及价值测算

土地是生态系统的载体,土地利用范围、结构和格局等可以作为生态服务功能供给的替代表征。本文采用谢高地等测度土地利用生态服务功能、获得生态系统服务价值的研究思路^[37],即根据土地利用相关矢量数据对评价网格单元生态系统服务水平进行快速评价。同时,结合 GI 功能分类及研究区实际,构建研究区适宜的生态系统服务价值指标体系及其当量系数(表 1)。

表 1 生态系统服务价值核算指标体系及其当量系数

Table 1 Ecosystem service value accounting index system and equivalence coefficient

服务类型 Service types	指标 Indictors	林地 Forest land	草地 Grassland	水域 Water
供给服务 Provisioning service	食物生产	0.29	0.22	0.80
	原材料生产	0.66	0.33	0.23
	水资源供给	0.34	0.18	8.29
调节服务 Regulating service	气体调节	2.17	1.14	0.77
	气候调节	6.50	3.02	2.29
	净化环境	1.93	1.00	5.55
	水文调节	4.74	2.21	102.24
支持服务 Support service	土壤保持	2.65	1.39	0.93
	维持养分循环	0.20	0.11	0.07
	生物多样性	2.41	1.27	2.55
文化服务 Cultural service	美学景观	1.06	0.56	1.89

由于经济价值精度会直接影响生态系统服务价值测算的最终结果,结合研究区实际生产力,选取小麦、稻谷、大豆作为主要粮食作物种类,依据公式(1)对其进行修正。通过历年《南京市统计年鉴》《全国农产品成本收益资料汇编》,确定 3 种粮食作物的播种面积、每公顷产量、总产量以及粮食价格。为消除价格波动、自然因素对测算结果的影响,进行不变价与均值处理。在单位面积生态系统服务价值当量及其经济价值的基础上,根据公式(2),计算单位面积的供给系数。具体公式为:

$$E_A = \frac{1}{7} \sum_{i=0}^n \frac{p_i m_i q_i}{M} \quad (1)$$

$$D C_k = D_{ij} \times E_a \quad (2)$$

式中, E_A 为 1km^2 内当量因子的供给 (元/ hm^2), n 为主要粮食作物类别数, q_i 为第 i 种粮食作物播种的面积, m_i 为第 i 种粮食作物的平均价格, p_i 为第 i 种粮食作物单位面积的平均产量, M 为粮食作物播种总面积; DC_k 为生态系统服务供给能力, D_{ij} 为单位面积生态系统服务价值当量。

表 2 单位国土面积的生态系统服务价值供给系数/(元 $\text{km}^{-2} \text{a}^{-1}$)

Table 2 Supply coefficient of ecological service value per unit area

服务类型 Service types	具体指标 Detailed indicators	林地 Forest land	草地 Grassland	水域 Water
供给服务 Provisioning service	食物生产	55056.21	41766.78	151879.20
	原材料生产	125300.34	62650.17	43665.27
	水资源供给	64548.66	34172.82	1573848.21
调节服务 Regulating service	气体调节	411972.33	216427.86	146183.73
	气候调节	1234018.50	573343.98	434754.21
	净化环境	366408.57	189849.00	1053661.95
	水文调节	899884.26	419566.29	19410161.76
支持服务 Support service	土壤保持	503099.85	263890.11	176559.57
	维持养分循环	37969.80	20883.39	13289.43
	生物多样性	457536.09	241108.23	484114.95
文化服务 Cultural service	美学景观	201239.94	106315.44	358814.61

2.3 GI 需求指标选取及测度

GI 提供的生态系统服务对维持城市化地区的生态安全以及保障经济社会的可持续发展具有重要的作用^[38]。综合考虑城市发展与环境保护对 GI 服务的需求,分别从社会、经济、生态、环境四个维度,选取人口规模、建筑密度、夜间灯光、土地开发强度、碳排放、破碎化、地表温度和 $\text{PM}_{2.5}$ 8 个指标进行综合评估。在社会方面,由于城市居民是 GI 主要的消费主体,因此,人口相关指标是社会需求的核心指标;高建筑密度代表着周围绿地配套差,而建筑密度低则区域内公共设施完善,因此,人口越多、建筑密度越高的区域,居民对 GI 的需求也越高。在经济方面,采用夜间灯光和土地开发强度表征 GI 经济需求,夜间灯光越亮、土地开发强度越大,GI 的经济需求越高。在生态方面,随着城市能源消耗量和碳排放量在不断上涨,碳排放越大则 GI 的固碳需求也越高;此外,GI 破碎化程度直接与生态斑块的服务功能和动植物栖息水平直接挂钩,破碎化程度越高则需要重点进行改善。在环境方面,热岛效应下城市地区气温高于郊区,导致城市地区对气温调节功能的需求较高;高浓度 $\text{PM}_{2.5}$ 出现在人类活动较强且生态环境脆弱的区域,导致空气净化需求增强。

运用 ArcGIS 10.5 软件,提取格网区域内各指标数值,在数据归一化下,熵值法通过确定各指标权重(表 3),然后利用栅格计算器分别计算社会、经济、生态、环境及总体需求。熵值法是根据各指标值的变化程度来确定指标权重,是一种客观分配方法,避免了人为因素带来的偏差,能更好地解释所得到的结果^[39]。

GI 供需状态受所在地域自然禀赋以及人类活动的共同影响,供给与需求的空间关联应该理解为二者的彼此协调、适应、匹配关系,包括二者在面积、功能乃至效应的契合匹配关系等,本文称其为供需适配类型区,是 GI 空间格局有序性和组织性的体现。为揭示供给与需求功能适应、匹配的特征,利用 ArcGIS 空间分析工具,对 2000、2010 和 2020 年的供需进行归一化,再依据耗散结构原理^[40]将供给与需求分别划分为高、中、低三个等级,构建纵横排列矩阵,形成 9 种类供需适配组合类型,作为全市供需适配类型区、空间格局演进分析及优化研究的依据(图 2)。GI 供需关系的适配程度研究,可为人与自然和谐共生的可持续发展理念提供一些规律性认知。

表 3 绿色基础设施需求评估指标及其权重

Table 3 Demand indicators and weight of green infrastructure

项 Items	指标 Indicators	信息熵值 e Information entropy value e	信息效用值 d Information utility value d	权重系数 w Weight coefficient $w/\%$
社会 Social demand	人口规模	0.9412	0.0588	18.80
	建筑密度	0.9541	0.0459	14.66
经济 Economic demand	夜间灯光	0.9448	0.0552	17.65
	开发强度	0.9738	0.0262	8.37
生态 Ecological demand	碳排放	0.9461	0.0539	17.24
	破碎化	0.9311	0.0689	22.02
环境 Environmental demand	地表温度	0.9997	0.0003	0.09
	PM _{2.5} 排放	0.9963	0.0037	1.17

2.4 GI 供需适配类型区

综合考虑各类适配区的面积与变化量、产业发展定位、居住区的疏密程度,重点对适配条件较差区和适配条件较好区进行研究。适配条件较差区是指 GI 供给不充分、需要增量补充与存量改造并重的区域,判定标准为三个时段面积增减易变,且 2020 年的供需差值为负,产业发展和居民生活对 GI 供给的需求有缺口;适配条件较好区是指 GI 供给较充足,只需存量改造提升与加强管护相结合的区域,判定标准为三个时段面积无起伏变化且呈逐渐增加趋势,产业发展和居民生活对 GI 的需求较小。

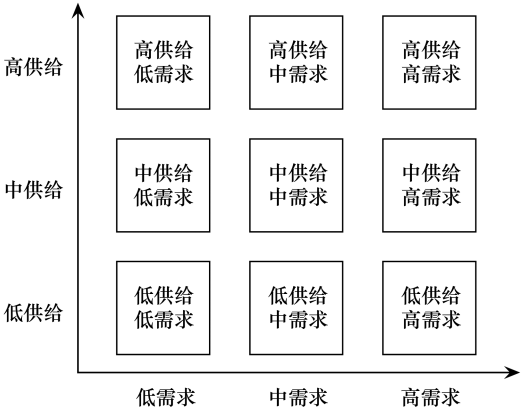


图 2 供需适配组合分类矩阵

Fig.2 Supply and demand matching zones criterion

3 研究结果

3.1 GI 供给与需求演进的主要特征

分别从南京市 GI 供给、需求、供-需适配关系进行时空分析,重点对 GI 供需适配类型分区现状问题及优化策略进行研究。

3.1.1 GI 供给的时空变化

(1) 供给总价值变化趋于稳定

2000—2020 年,南京市 GI 服务总供给价值呈先减少后增加。其中,2000—2010 年总供给由 64.6 亿元减少到 64.4 亿元,人均供给减少了 2.77 元/人,降幅仅 0.37%,总体趋于稳定态势(图 3)。2010—2020 年总供给有所回升,增长到 68.3 亿元,从 GI 构成要素来看,网络中心和自然廊道的供给能力明显提升带动生态系统服务供给大幅度提高(图 3)。

(2) 主城区供给价值增幅高于郊区

2000—2020 年,南京市 5 个郊区 GI 服务供给主要是依托山丘森林绿地与河流湖泊水域等要素共同支撑,20 年间供给价值增幅达 2.3 倍;主城境内山丘数量相对较少,主要供给源自长江干流、内外秦淮河、入江河流、各类景区以及公园绿地等,供给价值增幅达 3 倍多。主城 6 个辖区中,秦淮区和雨花台区分别减少 6.27% 和 5.08%,其余各区均有不同程度增加,其中鼓楼区和玄武区增幅最大,分别为 37.24% 和 32.00%,由于中心城区实施产业“退二进三”、工业企业搬迁,导致用地性质转换,另外城市化向主城以外推进,包括建设新城新区、扩展城市框架,中心城区重要生态用地面积逐步增加,水气环境质量明显改善,主城区供给价值整体较快增长(图 4)。

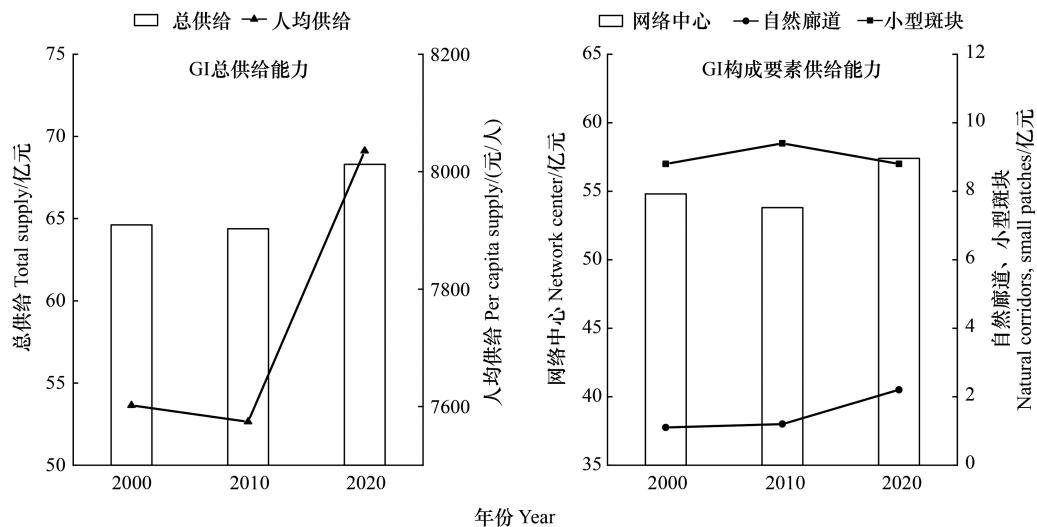


图3 南京绿色基础设施及其构成要素供给能力

Fig.3 Green infrastructure and its elements supply capacity in Nanjing

GI: 绿色基础设施 Green infrastructure

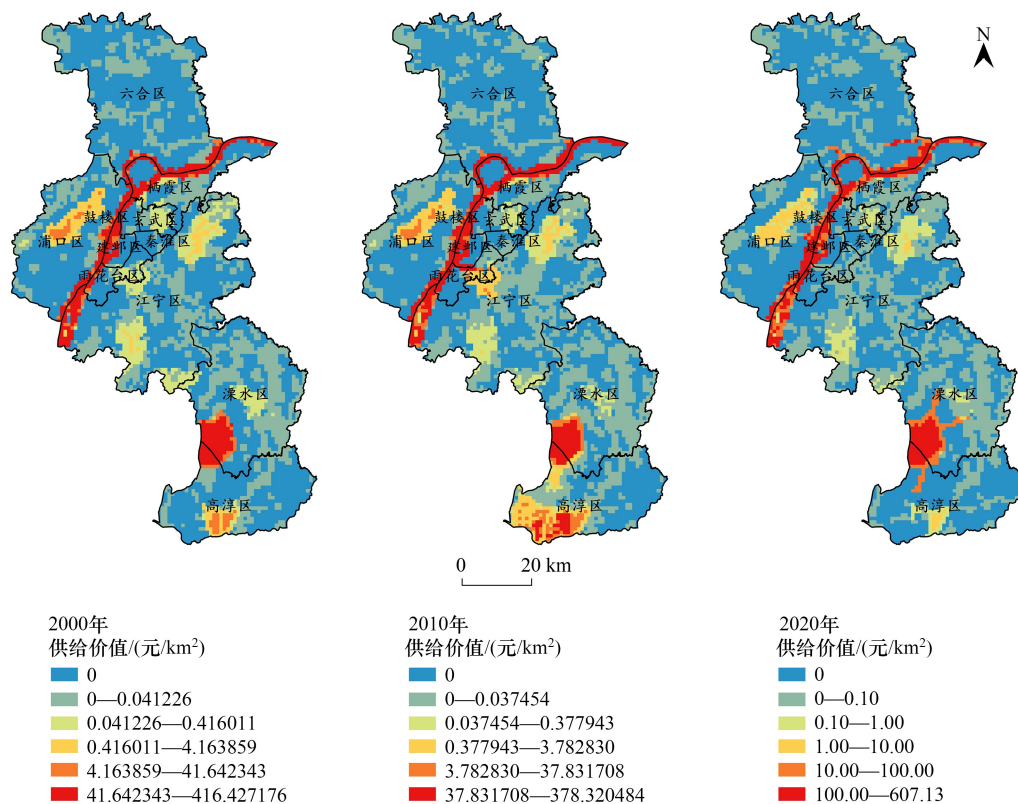


图4 2000—2020年南京市绿色基础设施服务供给空间格局

Fig.4 Distribution of GI service supply in Nanjing during 2000—2020

3.1.2 GI需求的时空特征

(1) 呈中心高、外围低的圈层分布格局

2000—2020年,南京市GI总需求逐年减少,具有中心高、外围低的圈层分布特征,形成以玄武区、鼓楼

区、秦淮区、建邺区和栖霞区为主的减少区,以浦口区、雨花台区、江宁区 and 溧水区为主的近郊先减后增区,以六合区和高淳区为主的远郊减少区。其中,2000 年高需求区呈主次核心分布格局,主核心位于以湖南路街道为中心的南北 7km、东西 5km 的区域,次核心位于葛塘街道和大厂街道等人居住区。2010 年高需求区大面积减少,中心城区的高需求逐步移向江北的化工园区。2020 年总需求进一步降低,以玄武、建邺、鼓楼和秦淮交接处的主城区为核心,向 S8 沿线、江宁北部、西部、溧水和高淳的政治文化中心集聚(图 5)。

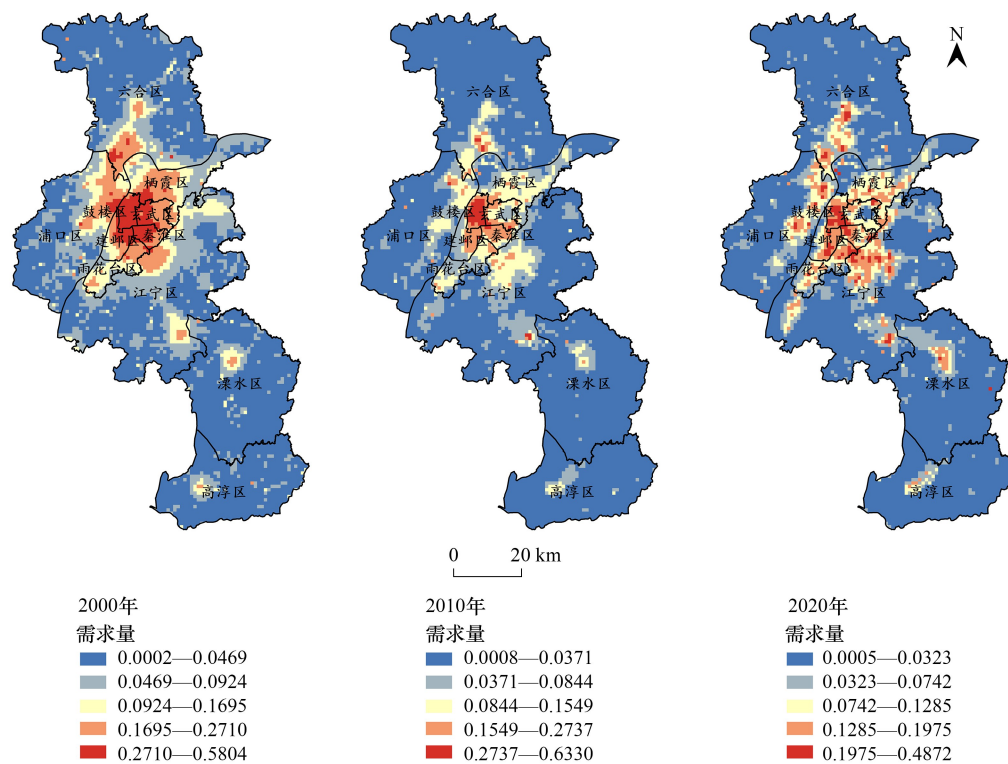


图 5 2000—2020 年南京市绿色基础设施需求空间格局

Fig.5 Distribution of GI demand in Nanjing during 2000—2020

数据归一化后消除了原数据的量纲和单位

(2) 各项需求增减变化存在差异

从各项需求看,南京市 GI 的经济需求由 0.0946 降低到 0.0260,降幅达到 72.52%。生态文明体制下,大力实施“见缝插针、留白增绿”,以减碳增汇等多种手段推进绿色低碳发展,生态需求逐年下降,由 2000 年的 0.0319 减少到 2020 年的 0.0160,降幅达 49.84%。2000 年以来,南京市先后颁布水、大气和土壤的污染防治管理条例,但大气、土壤环境治理仍有待加强,平均环境需求总体水平不高,且变化不大。社会需求随着人口持续增长和建筑密度增加呈逐年增加的趋势,由 2000 年的 0.0112 增加到 2020 年的 0.0248,增幅 121.4%。鼓楼、玄武、建邺 3 区对生态与社会供给需求较旺(图 6)。

3.2 GI 供-需适配关系的时空格局变化

依据 9 种供需适配类型,南京市 11 个辖区共形成 99 个适配类型。根据每个类型区 2000、2010、2020 年的面积及其变化特点,研究发现南京市有 24 个适配条件较好区,总面积约 1686.184km²,占市域总面积 26%,其余为条件较差区,面积约 2872.744km²,占 44%。从 9 种适配组型的时空演进趋势看,主城区 3 个时段供需适配关系是由低供给-高需求向低供给-中需求转变,5 个郊区低供给-低需求的时空格局比较稳定。供需适配关系较好的条件下,充足的供给与适度的需求相匹配,对建设绿色低碳、多元宜居、山水林田相依相融的美丽南京将发挥重要支撑作用(图 7)。

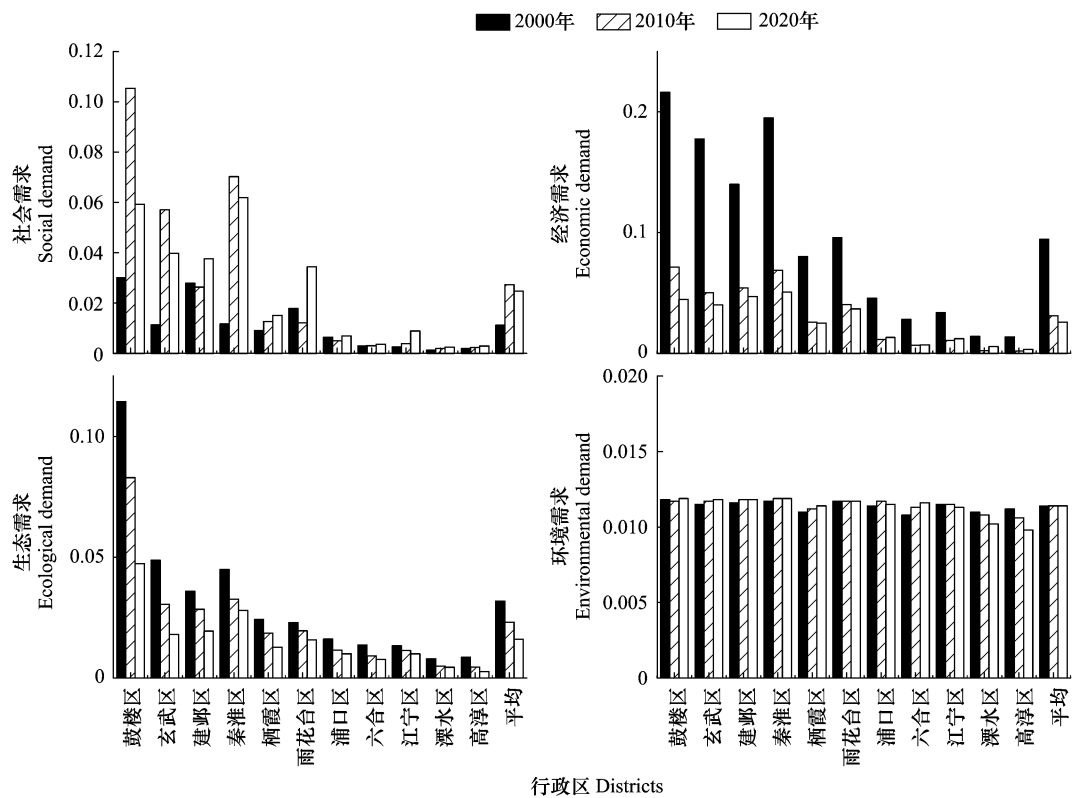


图 6 2000—2020 年南京市各区绿色基础设施需求
Fig.6 GI demand of Nanjing districts during 2000—2020
数据归一化后消除了原数据的量纲和单位

3.3 GI 供需适配类型分区

(1) 适配类型较好区

适配类型较好区数量与面积具有明显的区域差异性,其中,具有 2 个配型充足组合区 8 个、3 个配型组合的 1 个区、1 个配型组合的 2 个区。适配类型区的供需关系有低与低、低与中、低与高、中与低、高与低、高与中的搭配类型等(表 4)。主城区低供给类型面积大于需求,主要原因是土地性质的转换,“退二进三”、旧城改造等使得部分工业用地转为居住用地、农业用地转为居住或服务用地,GI 建设未能跟上居住区集聚发展速度。郊区高供给面积大于需求,主要是高程在 100m 以上的山丘多属国家级和省级禁止及限制开发区域、居住区及产业集聚度较低,此类区域的需求自然较低(图 7、表 4)。

表 4 供需适配类型区面积/km²
Table 4 Supply and demand adaptation type zone area

地区 Districts	适配较好 Better adaptation regions	适配较差 Poorly adaptation regions	地区 Districts	适配较好 Better adaptation regions	适配较差 Poorly adaptation regions
鼓楼区	11.14	33.84	江宁区	99.70	1359.20
玄武区	61.14	14.08	溧水区	136.17	926.99
秦淮区	26.68	22.47	浦口区	878.19	164.63
建邺区	49.98	13.11	六合区	84.52	136.54
雨花台区	39.32	59.13	高淳区	87.80	63.54
栖霞区	211.56	43.45	合计 Total	1686.18	2872.74

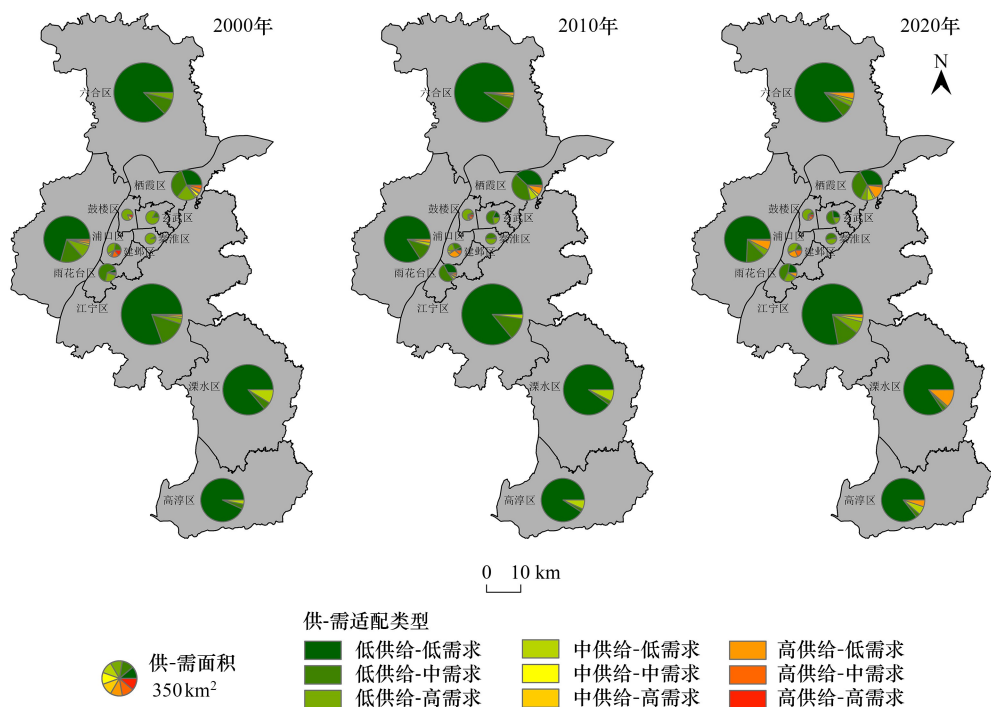


图7 2000—2020年南京市绿色基础设施供-需适配分区

Fig.7 Green infrastructure supply-demand adaptation zone of Nanjing during 2000—2020

(2) 适配类型较差区

与2000年相比,南京市2020年适配类型较差区的数量变化与面积减少幅度存在明显的地域分异特征:3个配型组合的浦口、栖霞和溧水区面积减少幅度在16—94%,其中以溧水区的中供给-低需求型减少幅度最大,2个配型组合的鼓楼、江宁、建邺和六合区减少范围在3%—93%,仅1个配型组合的秦淮、玄武、雨花台、高淳区减少范围在9%—78%。江宁、溧水区的低供给-低需求减少幅度最小,20年间虽有一定的变化,但至2020年基本维持在3%的水平,可能与严格控制生态敏感用地的无序开发建设,同时与生态红线保护区域管控要求进行调控与优化有关。鼓楼、秦淮、玄武、栖霞、雨花和建邺6个辖区对GI存在较高需求,原因是旧城改造、城市风貌改善、环境品质提升等需要GI功能的支撑;浦口、六合、江宁、溧水和高淳等近郊和远郊区的需求水平有所降低(表4)。

4 讨论

4.1 GI供需之间的适配和不适配

根据三期土地利用现状数据,运用生态系统服务价值法测算了南京市GI供给价值;基于多源数据,从社会、经济、环境和生态四个维度构建绿色基础设施需求指标体系,分别测算了GI需求水平。在此基础上对南京市GI供需适配关系进行空间分析,为针对性地调整GI供给结构提供了参考依据。

南京市绿色基础设施供给总量测算结果与相关南京市生态服务价值的研究测算结果相差较小^[41]。关于GI供给服务呈“主城低、郊区高”,总需求呈“中心高、外围低”的圈层分布格局的结论与当前相关研究基本一致,如吴晓等^[42]通过西安市的研究认为“绿色基础设施供给从城市边缘向中心减少,而需求则表现出相反的格局,并且在城市各功能区内差别显著”,王晶晶等^[31]认为“环太湖绿色基础设施格局具有明显的多中心集聚分布特征,高供给区主要集中在生态本底条件好的城市郊区,而高需求区主要分布在太湖东岸综合发展水平较高的苏南城镇密集区”。在适配关系方面,王晶晶等发现环太湖东岸城市群地区较高、南岸近郊与远郊

区域较低,由于其评价单元较大,研究结论略粗;Dai 等^[43]发现武汉高需求高供给区域主要集中在调节服务高度发达的地区,供需不适配引起的环境不平等在小城市中心需要政府紧急关注。而本文基于城市现代化发展需要,从全市的角度对供需关系适配组合进行划分,每个区域几乎均有涉及各类适配类型,从清除影响景观连通性的阻隔点、改善存量 GI 服务水平、提升增量 GI 效能发挥、科学识别生态资源、强化生态环境治理角度多措并举实现 GI 供需适配均衡发展^[10,44-45],为大城市地区提升 GI 保供能力提供更加有力的科学依据。

城市居民主要受益于 GI 提供的生态系统服务,因此 GI 优化应始于生态系统服务与人类活动不适配的区域^[43]。在经济高质量发展的背景下,南京市作为特大城市转型发展的代表,GI 成为南京市“生态优先、绿色发展”的战略支撑,通过 GI 的科学规划布局实现城乡空间生态协调发展尤为重要,参阅《南京市城市总体规划(2018—2035)》,可以看出,本文提出的关于主城由低供给-高需求向低供给-中需求转变与维持 5 个郊区低供给-低需求格局的观点,以及关于适配条件较好与较差类型区划分的探讨等,与该规划关于“南北田园、中部都市、拥江发展、城乡合融”的市域空间格局以及“古都为核、江河融汇、城丘绿间、多心辉映”的理想空间方案有一定的契合。

4.2 GI 供需适配研究的学术价值

在中国环境污染、生态破坏尚未与经济发展完全脱钩的背景下^[8],作为一种实现绿色发展和精明增长的基于自然的解决方案^[37],GI 研究具有重要的学术价值。GI 供需要素功能价值演进研究的学术意向旨在揭示其对大城市区域生态服务功能品质提升及其维护区域生态安全的发展轨迹、贡献水平或支撑能力及优化调控途径。从可持续发展观看需求与供给的关系,二者的密切关联应建立在相互适应、适宜与匹配的基础上,其中需求应是行为主体,供给是满足需求的行为客体。随着现代科学技术的发展,主体的能动作用日益增强,需求的目标更加宽阔多样,客体的供给能力也应不断提升。基于以上的认识,本文提出将供需评价要素与指标作为剖析供需关联的基本条件,研究给出在设定条件下需求与供给的相互适应程度和主导脉络,这就需要对供给与需求分别进行时空动态分析与整合评判相结合,探寻二者相互适合的匹配方式,在生态禀赋得到优先保护和城市社会经发展协同调控条件下,适配的方式因地因时而异。

4.3 GI 供需适配研究的未来方向

本文尝试性地开展了供需适配关系的理论探讨、适配类型的划分,其等级差异的评判原则与标准以及相关的应用等应该成为 GI 领域深化研究的重要方面。此外,GI 研究涉及生态、建筑规划、地理、资源、环境、社会经济、管理等多个学科领域,交叉与融合研究是深入探讨 GI 供需关联理论基础、系统方法以及实践应用的可选之路。GI 供需关联要素、指标、标准等评价条件的拓展、供需契合匹配类型及空间模式、需求主体动能表征(社会进步与经济发展)及量度显示、与双碳战略结合的要素范围等研究应该视为今后拓展研究的主攻方面。与此同时,还应关注国土空间规划、城市总体规划、绿地系统规划等空间规划对 GI 供需关联研究的需求,为其提供相关的科学依据。然而,本文在供需指标选取方面存在一定局限性,对政府、企业和公众的部分主观需求有所忽略;受人口、建筑密度和 PM_{2.5} 等长时间序列数据获取难度和土地开发强度、破碎化等指标计算方法的影响,数据精准表达尚有一定的不足,进而影响供需时空演进情势的分析。

5 结论

通过研究南京市 2000 年、2010 年和 2020 年三个时段两个维度 GI 供需关系时空演进特征与规律,揭示 GI 格局优化重点区域。主要结论如下:

(1)GI 供需关系时空变化特征。通过供给与需求单要素变化情势评估发现,南京市 GI 服务总供给价值呈先减少后增加的趋势,水域供给服务功能显著增强,由于城市化进程受到产业结构转型升级及生态保护和约束政策影响,主城区与郊区 GI 用地格局逐步得到优化,其供给价值均大幅增长,对城市生态系统功能品质的提升和维护城乡生态安全起着重要支撑作用。南京市 GI 总体需求逐年减少,分项需求中经济需求与生态需求呈下降趋势,社会需求有所增加;GI 需求的空间分布呈现中心高、外围低的圈层特征。

(2) 供需适配类型组合分区原则与依据。南京作为大城市生态系统,物质能量流量大、运转快、是一个高度开放的区域性生态系统,其 GI 供给与需求的空间关联较为复杂多样,既有供大于需,也有需大于供等不均衡情况。为揭示 GI 供给与需求的空间关联特点,采用耗散结构原理关于开放系统要素无序性减少和有序性增加的理念以及地理学地域分异理论,将供给与需求适配程度划分成具有等级差异的类型,以全市 11 个辖区为需求主体,将其境内的生态服务功能作为客体,划分表征二者供需关联适配程度的类型及其组合,GI 供需适配较好区与较差区分别占市域总面积的 26% 和 44%。

(3) GI 空间优化提升路径和政策建议。针对市域辖区各类型供需空间配置的异质性和有序性,提出存量提质改造和增量结构优化并重的举措。中心城区的 6 个辖区 GI 新增供给能力有限,一方面需要存量改造出新、提升品质、新增量高效发挥效能,提升风景区品质,增加开敞空间面积,强化绿道建设;另一方面需要在绿色发展中,调优产业结构与布局,加快发展都市型产业,坚持污染源头治理,持续改善与提升环境质量,不断减少各类需求的压力,使适配较好类型区面积增大,较差类型区的面积不断减少。就全市而言,格局优化进程中应高度重视 GI 保供能力的提升,确保江河湖库流域生态涵养功能健全,确保水生态、水环境、水文化功能整体高效发挥。建设廊道系统增强 GI 的连通性,疏通城乡生态脉络,有效串联和衔接主城与郊区生态斑块,营建城乡一体化安全韧性的生态防护网络,维持地域生态系统的稳定性和整体性。

参考文献 (References):

- [1] Tzoulas K, Korpela K, Venn S, Yli-Pelkonen V, Kaźmierczak A, Niemela J, James P. Promoting ecosystem and human health in urban areas using Green Infrastructure: a literature review. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 81(3): 167-178.
- [2] 赵海霞, 范金鼎, 骆新燎, 朱天源, 孟菲, 顾斌杰. 绿色基础设施格局变化及其驱动因素——以南京市为例. *生态学报*, 2022, 42(18): 7597-7611.
- [3] 张晋石. 绿色基础设施——城市空间与环境问题的系统化解决途径. *现代城市研究*, 2009, 24(11): 81-86.
- [4] 肖华斌, 何心雨, 王玥, 王洁宁, 姜芊孜. 城市绿地与居民健康福祉相关性研究进展——基于生态系统服务供需匹配视角. *生态学报*, 2021, 41(12): 5045-5053.
- [5] 何传启. 中国式现代化的分层结构和三个建议. *中国科学院院刊*, 2023, 38(3): 484-491.
- [6] Glaeser E. Cities, productivity, and quality of life. *Science*, 2011, 333(6042): 592-594.
- [7] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, Redman C L, Wu J G, Bai X M, Briggs J M. Global change and the ecology of cities. *Science*, 2008, 319(5864): 756-760.
- [8] 周亮, 车磊, 周成虎. 中国城市绿色发展效率时空演变特征及影响因素. *地理学报*, 2019, 74(10): 2027-2044.
- [9] 桂昆鹏, 徐建刚, 张翔. 基于供需分析的城市绿地空间布局优化——以南京市为例. *应用生态学报*, 2013, 24(5): 1215-1223.
- [10] 刘佳, 尹海伟, 孔繁花, 李沐寒. 基于电路理论的南京城市绿色基础设施格局优化. *生态学报*, 2018, 38(12): 4363-4372.
- [11] 刘焱序, 傅伯杰, 王帅, 赵文武, 李琰. 空间恢复力理论支持下的人地系统动态研究进展. *地理学报*, 2020, 75(5): 891-903.
- [12] Venkataramanan V, Packman A I, Peters D R, Lopez D, McCuskey D J, McDonald R I, Miller W M, Young S L. A systematic review of the human health and social well-being outcomes of green infrastructure for stormwater and flood management. *Journal of Environmental Management*, 2019, 246: 868-880.
- [13] 顾康康, 杨倩倩, 程帆, 储金龙, 陈晓华. 基于生态系统服务供需关系的安徽省空间分异研究. *生态与农村环境学报*, 2018, 34(7): 577-583.
- [14] Dong X Y, Yi W X, Yuan P, Song Y H. Optimization and trade-off framework for coupled green-grey infrastructure considering environmental performance. *Journal of Environmental Management*, 2023, 329: 117041.
- [15] Laforteza R, Davies C, Sanesi G, Konijnendijk C C. Green Infrastructure as a tool to support spatial planning in European urban regions. *IForest-Biogeosciences and Forestry*, 2013, 6(1): 102-108.
- [16] Wang Y F, Ni Z B, Chen S Q, Xia B C. Microclimate regulation and energy saving potential from different urban green infrastructures in a subtropical city. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 226: 913-927.
- [17] 胡凤宁, 周亮. 城市绿色基础设施降温作用及其影响因素研究进展. *生态学报*, 2023(11): 1-16[2023-05-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2031.Q.20230210.1446.070.html>.
- [18] Ramyar R, Saeedi S, Bryant M, Davatgar A, Mortaz Hedjri G. Ecosystem services mapping for green infrastructure planning-The case of Tehran. *Science of the Total Environment*, 2020, 703: 135466.

- [19] Li L, Bergen J M. Green infrastructure for sustainable urban water management: practices of five forerunner cities. *Cities*, 2018, 74: 126-133.
- [20] Lovell S T, Taylor J R. Supplying urban ecosystem services through multifunctional green infrastructure in the United States. *Landscape Ecology*, 2013, 28(8): 1447-1463.
- [21] Navarrete-Hernandez P, Laffan K. A greener urban environment: designing green infrastructure interventions to promote citizens' subjective wellbeing. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 191: 103618.
- [22] Kim G, Miller P A. The impact of green infrastructure on human health and well-being: the example of the Huckleberry Trail and the Heritage Community Park and Natural Area in Blacksburg, *Virginia*. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 48: 101562.
- [23] Nutsford D, Pearson A L, Kingham S. An ecological study investigating the association between access to urban green space and mental health. *Public Health*, 2013, 127(11): 1005-1011.
- [24] Johnson C, Tilt J H, Ries P D, Shindler B. Continuing professional education for green infrastructure: fostering collaboration through interdisciplinary trainings. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, 41: 283-291.
- [25] Kousky C, Olmstead S M, Walls M A, MacAuley M. Strategically placing green infrastructure: cost-effective land conservation in the floodplain. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(8): 3563-3570.
- [26] Teotónio I, Silva C M, Cruz C O. Eco-solutions for urban environments regeneration: the economic value of green roofs. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 199: 121-135.
- [27] Mell I C, Henneberry J, Hehl-Lange S, Keskin B. To green or not to green: establishing the economic value of green infrastructure investments in The Wicker, Sheffield. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2016, 18: 257-267.
- [28] Pakzad P, Osmond P. Developing a sustainability indicator set for measuring green infrastructure performance. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2016, 216: 68-79.
- [29] Wang J X, Xu C, Pauleit S, Kindler A, Banzhaf E. Spatial patterns of urban green infrastructure for equity: a novel exploration. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 238: 117858.
- [30] Zhu Z Q, Ren J, Liu X. Green infrastructure provision for environmental justice: application of the equity index in Guangzhou, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, 46: 126443.
- [31] 王晶晶, 尹海伟, 孔繁花, 许峰. 基于供需匹配度视角的环太湖区域绿色基础设施网络构建. *城市建筑*, 2017(36): 19-24.
- [32] Ying J, Zhang X J, Zhang Y Q, Bilan S. Green infrastructure: systematic literature review. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 2022, 35(1): 343-366.
- [33] 王永衡, 李春林, 王昊, 梁碧苗, 吕建树. 绿色基础设施的生态环境领域研究现状及热点. *生态学报*, 2022, 42(6): 2510-2521.
- [34] 杨振山, 张慧, 丁悦, 孙艺芸. 城市绿色空间研究内容与展望. *地理科学进展*, 2015, 34(1): 18-29.
- [35] 陈爽, 刘云霞, 彭立华. 城市生态空间演变规律及调控机制——以南京市为例. *生态学报*, 2008, 28(5): 2270-2278.
- [36] Conway T M, Khan A, Esak N. An analysis of green infrastructure in municipal policy: divergent meaning and terminology in the Greater Toronto Area. *Land Use Policy*, 2020, 99: 104864.
- [37] 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.
- [38] 毛源远, 张正栋, 董剑彬, 杨阳, 曹君, 陈宋佳, 匡腾飞. “水-能源-粮食”视角下粤港澳大湾区生态安全格局的构建及优化. *热带地理*, 2022, 42(2): 328-338.
- [39] 徐雪, 王永瑜. 中国乡村振兴水平测度、区域差异分解及动态演进. *数量经济技术经济研究*, 2022, 39(5): 64-83.
- [40] 邬建国. 耗散结构、等级系统理论与生态系统. *应用生态学报*, 1991, 2(2): 181-186.
- [41] 孟孟, 张运, 支俊俊, 丁玥, 王爱芳, 沈豪. 快速城市化背景下生态系统服务价值时空演变——以南京市为例. *水土保持通报*, 2021, 41(3): 296-304.
- [42] 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.
- [43] Dai X, Wang L C, Tao M H, Huang C B, Sun J, Wang S Q. Assessing the ecological balance between supply and demand of blue-green infrastructure. *Journal of Environmental Management*, 2021, 288: 112454.
- [44] Chen F, Li X X, Yang Y J, Hou H P, Liu G J, Zhang S L. Storing E-waste in green infrastructure to reduce perceived value loss through landfill siting and landscaping: a case study in Nanjing, China. *Sustainability*, 2019, 11(7): 1829.
- [45] 魏家星, 宋轶, 王云才, 象伟宁. 基于空间优先级的快速城市化地区绿色基础设施网络构建——以南京市浦口区为例. *生态学报*, 2019, 39(4): 1178-1188.