

面向花园城市建设需求的社区景观生态系统服务供给与获取效率关系研究

Research on the Relationship Between Supply and Acquisition Efficiency of Ecosystem Services in Community Landscape for the Needs of Garden City Construction

周景宇 葛韵宇* 李方正
ZHOU Jingyu GE Yunyu* LI Fangzheng

(北京林业大学园林学院, 北京 100083)
(School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing, China, 100083)

文章编号: 1000-0283(2025)02-0031-11
DOI: 10.12193/j.laing.2025.02.0031.004
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2024-11-03
修回日期: 2024-12-30

摘要

花园城市背景下需要深入探讨城市中人与自然的相互关系。研究社区景观生态系统服务的供给与居民获取效率,有助于以新的视角探讨这种关系,并促进生态系统服务低效空间的精准提升。基于社区景观生态系统服务评价和空间聚类分析,探究不同空间的生态系统服务特点;并通过耦合生态系统服务与可达性的评价结果,探究生态系统服务供给与获取效率的耦合协同关系;最后通过随机森林回归模型探究关键因素对二者耦合协同程度的影响。结果表明,综合过渡空间的社区景观综合服务指数较高,且服务异质性为三类空间中最高,可塑性强;大型绿地往往对应高耦合协同程度,孤立的小型绿地则很难提供高效的服务水平;局部围合且形状复杂的绿地结构有利于提升社区尺度生态系统服务的供给与获取效率;NDVI对于耦合协同的重要性程度最高且为正相关,居住建筑密度及功能设施密度则相反。根据研究结果,从服务功能重要性、服务功能结构性、服务功能可用性三个方面提出优化策略,旨在为花园城市背景下的社区景观生态系统服务供给与获取效率的协同提升提供参考。

关键词

花园城市;生态系统服务;可达性;耦合协调度

Abstract

In the context of garden cities, it is necessary to deeply explore the city's mutual relationship between people and nature. Studying the supply and acquisition efficiency of community landscape ecosystem services can help analyze this relationship from the perspective of the flow of ecosystem service supply and demand and promote the precise improvement of inefficient spaces in ecosystem services. This study is based on evaluating community landscape ecosystem services and spatial clustering analysis, exploring the level of ecosystem services in different spaces. By coupling the evaluation results of ecosystem services and accessibility, explore the coupling and synergistic relationship between ecosystem service supply and acquisition efficiency. Finally, it explores the influence of key factors on the degree of coupling and synergy between the two through a random forest regression model. The results indicate that the comprehensive transition space's community landscape comprehensive service index is relatively high, and the service heterogeneity is the highest among the three types of spaces, with strong plasticity. Ample green space often corresponds to a high degree of coupling and collaboration, while isolated small green space makes it challenging to provide an efficient service level. The partially enclosed green space structure with a complex shape improves the supply and acquisition efficiency of the community-scale ecosystem; NDVI has the highest importance and positive correlation for coupling collaboration, while residential building density and functional facility density are the opposite. According to the research results, this paper puts forward optimization strategies from three aspects: the importance, the structure, and the availability of service functions, aiming at providing a reference for the collaborative improvement of community landscape ecosystem service supply and acquisition efficiency in the context of garden cities.

Keywords

garden city; ecosystem services; accessibility; coupling coordination degree

周景宇

1997年生/男/山东东营人/在读硕士研究生/研究方向为风景园林规划与设计

葛韵宇

1992年生/女/河北石家庄人/博士/副教授/研究方向为风景园林规划与设计、绿色空间生态系统服务

李方正

1989年生/男/山东济南人/博士/副教授/研究方向为风景园林规划设计与理论、绿色空间生态系统服务、风景园林与公共健康

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: geyunyu717@bjfu.edu.cn

基金项目:

国家重点研发计划课题“城市蓝绿空间规划与生态系统服务功能优化技术”(编号: 2022YFC3802603);北京市科协青年人才托举工程项目(编号: BYESS2022125)

随着新一轮百万亩造林行动的顺利结束以及森林城市建设不断取得成效,北京市以习近平生态文明思想为指引,赓续发展森林城市相关理念,开启花园城市建设的新阶段。为实现“把首都建设成为一个大花园”的目标^[1],北京市立足绿色资源禀赋,打造老城、副中心及南苑等精华片区,协同推进多项建设行动,实现了城市绿色福祉的持续提升^[2]。尽管花园城市建设取得了一定进展,但生态系统服务的低效和不平衡分配,以及人民群众对于提升幸福感和获得感的迫切需求,仍是亟需关注和解决的关键问题。

2024年4月,北京市人民政府印发《北京花园城市专项规划(2023年-2035年)》^[3],规划提出以建设好小区、好社区等入手,塑造花园场景,打造功能复合、健康韧性的生活空间。在建设实践中,如何对社区环境展开针对性评价,摸底现状问题,以科学的策略指导生活空间建设将在很大程度上影响生态系统服务及人民幸福感的提升。在花园城市生活空间建设中需要探究城市人与自然的相互关系,通过生态系统服务供需流动理论^[4]建立二者的关系可以为相关的评价及研究提供新的视角。花园城市可以通过建设绿地景观——即服务供给区,为居民提供生态系统服务。同时,通过支持社交联系、娱乐、自然体验等活动,为居民提供健康福祉^[5]。而居民作为服务受益者,通过增加从受益区到供给区的移动机会可以更好地享受到生态系统服务的供给^[6]。研究表明,生态系统服务可以反映城市生境质量^[7]、景观韧性^[8]及居民精神满足情况^[9],这与花园城市建设中生境质量提升、城市韧性增强、康养环境优化及绿色空间共享等要求一致。社区景观可达性则指社区空间的任意一点到社区景观的相对难易程度。可达性提高意味着居

民能够更容易地获得景观提供的生态系统服务^[10],从而提高了服务的获取效率和居民的福祉水平。目前,将可达性作为相关服务能力 and 居民福祉的重要评估指标,已形成广泛且成熟的应用^[11-12]。因此,探究社区景观生态系统服务与可达性的耦合协调度,可以在一定程度上反映生态系统服务供给能力和居民福祉水平的相互关系,识别生态系统服务供需之间的时空耦合格局,提升居民获取生态服务的效率。

生态系统服务耦合研究在理论和方法上取得了一定的进展。研究者已开发多种概念和评估方法来模拟和量化生态系统服务与不同对象的耦合关系。然而,目前对于生态系统服务与可达性的相关研究相对较少。其中,Liang等^[13]采用改进的多步移动搜索法探究公园绿地的综合可达性,并对各城市绿地的可达性服务效率进行评估。研究在条件和需求的匹配程度上探讨城市绿地可达性的服务效率,启发了在供需两端探究生态系统服务相关效率的思考。Chen等^[14]分析交通可达性与生态系统服务供需的相关影响和空间依赖关系,发现交通可达性的增加促进了生态系统服务供需耦合度。研究是在城市群尺度进行,尚未涉及二者在社区尺度的相互关系,但仍对生态系统服务供给与可达性的空间耦合研究具有一定启示。Xu等^[15]的研究证明生态系统服务供给与公园可达性在一定距离内存在统计关联性。但这些研究并没有从生态系统服务的供给与获取效率出发,将生态系统服务供给与可达性进行耦合,因此二者的空间耦合可以为相关研究打开新的视角。同时,生态系统服务能力不仅取决于其服务功能的高低,还取决于其空间结构和可用性。因此,目前的研究尚缺乏在服务功能重要性、服务功能结构性、服务功能可用性

层面对生态系统服务的指标体系进行全面结合的评价。

本研究的核心内容是耦合社区景观可达性与生态系统服务功能重要性、服务功能结构性、服务功能可用性的综合评价结果,以创新视角反映生态系统服务供给与获取效率的耦合协同关系,并以此探究不同关键因素对耦合协同程度的影响。基于不同生态系统服务空间类型的低效问题,针对性地提出解决策略。研究旨在帮助决策者在规划实践中合理、高效、均衡地分配有限的资源,从而精准提升各类社区中生态系统服务的供给与获取效率。研究结果可以促进花园城市背景下社区景观生态系统服务的可感知、可获取及全民共享,营造功能复合、健康韧性的社区生活空间。

1 研究区概况

研究参考北京市丰台区玉泉营街道控制性详细规划,在玉泉营街道下辖范围内选取以草桥社区及草桥村为主的片区作为研究区域(图1),面积约为140 hm²。研究区以南三环路、草桥东路、赵村店路及京开高速为界,内含草桥社区、草桥欣园等4个小区及北京大兴国际机场城市航站楼草桥站。草桥一带地势平坦,水源丰富,花卉产业发达,为北京著名的花乡。依托丰富的历史底蕴,并经过多年规划建设,该区域建成了以北京世界花卉大观园为主的的城市公园、不同规模的口袋公园及各类小微绿地,并成为“北京最美乡村”及全国示范性老年友好型社区。研究区域虽然以居住用地为主,但毗邻玉泉营街道商务核心区,现状产业已形成一定规模和基础。同时,该区域位于花园城市规划中风景景观视廊一带,绿化覆盖率较高,且在经济、产业、文化及生态环境等

方面具备花园城市建设的良好基础。然而，在花园城市建设中，能否实现社区景观生态系统服务的高效性，保证社区居民对生态系统服务的可感知、可获取，还有待进一步研究。

2 研究方法

2.1 概念框架

本研究基于《北京花园城市专项规划(2023年-2035年)》建立花园城市社区景观生态系统服务供给与获取效率的评价体系。该体系围绕花园城市建设的目标要求展开，解释了生态系统服务供给区的景观供给及受益区的居民获取效率。在社区景观生态系统服务供给及获取效率评价之后，通过运用耦合协调度评估建立花园城市景观供给与居民获取的耦合关系；借助空间聚类识别并划分各类生态系统服务簇，统计各簇的生态系统服务供给、获取效率评估结果及耦合协调度；使用相关性分析及随机森林回归模型，探究关键因素对耦合协调度的影响，以探究现状生态系统服务存在的低效问题及原因，提出社区景观生态系统服务供给与获取效率的精准提升策略(图2)。

2.2 构建花园城市社区景观服务评价体系

围绕花园城市指标体系建设中与社区生活环境息息相关的4大方面，包括生态环境质量指标匹配提升自然空间生境质量、景观韧性指标匹配增强气候适应的城市韧性、绿色空间可用性指标匹配创造全民共享的绿色空间和提供绿色生态的游憩体验以及景观空间结构的优化需求，建立花园城市社区景观服务评价体系。该体系中，生态环境质量和景观韧性水平反映服务功能重要性，绿色空间可用性反映服务功能可用性，景观空

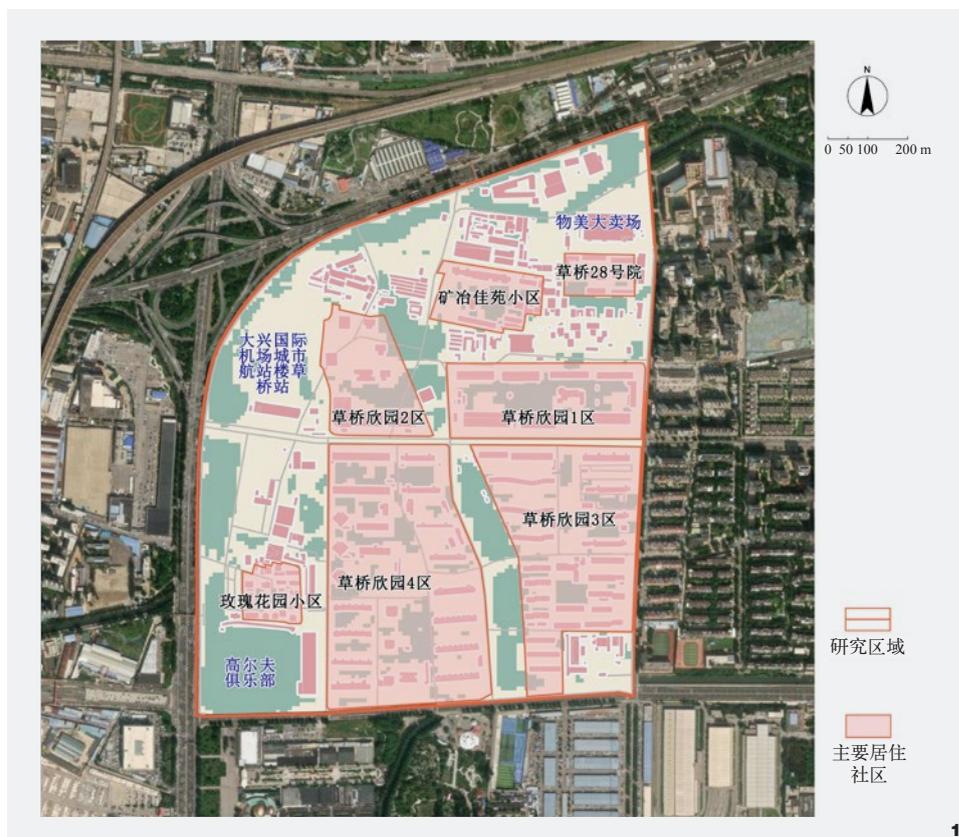


图1 研究区域现状
Fig. 1 Current situation of the research area

间结构特征反映服务功能结构性，其能够实现多维度的花园城市社区尺度景观生态系统效能评估，并为后续花园城市建设提出针对性的指导策略。根据花园城市规划的要求和社区景观的建设需要，使用层次分析法构建了包含4个准则层和6个指标层的评价体系(表1)。所选6个指标不仅可以通过数据的收集和分析来进行客观评价，也能够通过主观经验确定各指标重要性。指标评价相关的基础数据主要有土地利用数据(源自ESA_WORLDCOVER平台)、DEM数据(源自National Aeronautics and Space Administration平台)、植被归一化指数(NDVI)数据(基于遥感影像数据反演)、叶面积指数数据(源自国家科技

资源共享服务平台)、降水数据(源自国家科技资源共享服务平台，经过反距离法处理)。研究通过10 m精度的数据网格评价各项指标，以50 m的尺度评价景观空间结构特征指标，并将评价结果归一化到0~1，形成指标层评分。最后，通过结合客观的定量分析及主观的专家经验，确定该体系中各指标的权重。

在权重判断过程中，为确保权重因子的客观性和可靠性，研究收集了30位风景园林专家的打分结果，并通过层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)软件yaahp，构建判断矩阵。yaahp使用“1-9比例标度法”构造判断矩阵，并可以对不一致的判断矩阵进行自动修

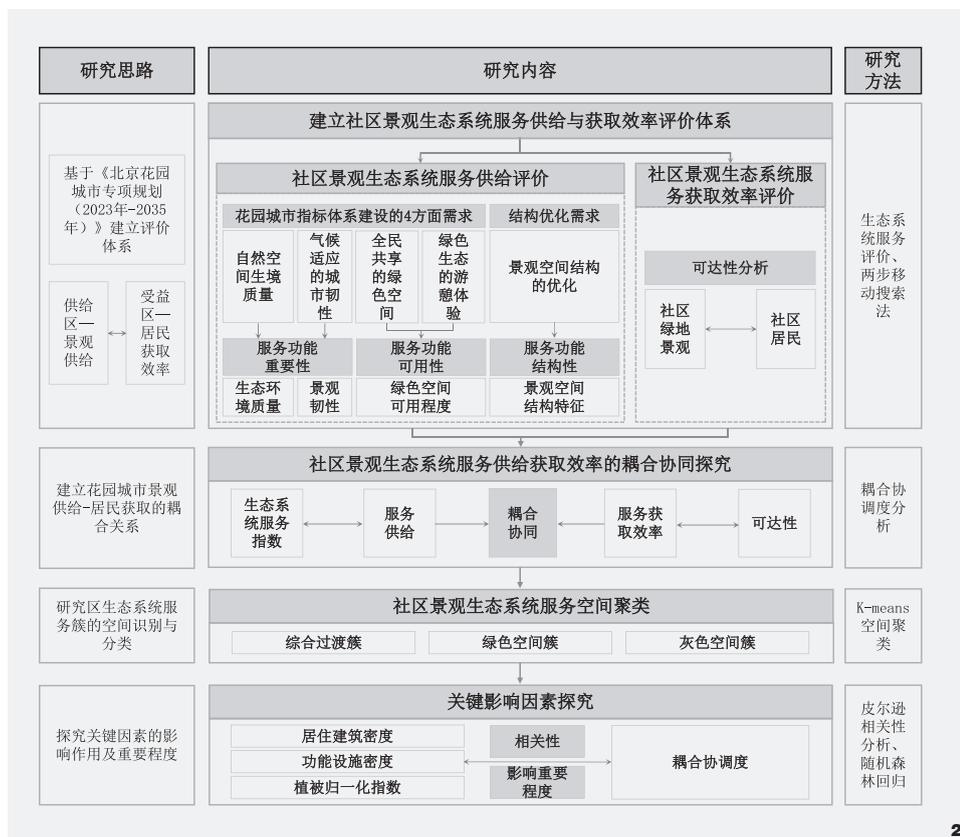


图2 研究概念框架
Fig. 2 Conceptual framework of the study

正。然后, 研究使用SPSS软件对归一化的指标进行主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA), 并据此计算各生态系统服务得分及其权重因子。主成分分析法是通过“降维”, 把多个指标变换成少数综合指标的多元统计方法^[16]。通过计算各主成分得分及模型得分系数, 得出各指标权重值。

2.3 社区景观综合服务指数及可达性的评价与识别方法

结合主观的层次分析法和客观的主成分分析法, 得出花园城市社区景观各生态系统服务指标的权重。将各指标权重和指标评分加权叠加得出社区景观综合服务指数, 见公式(1)。

$$E = \sum_{i=1}^n B_i V_i \quad (1)$$

式中, i 表示居民的空间单元, E 表示社区景观综合服务指数, 值域在0~1范围内; B_i 为各指标结合主成分分析和层次分析修正后的权重; V_i 表示各指标在指标层的评分结果。

运用K-means聚类分析^[17]对社区景观综合服务指数的评价结果进行空间聚类, 从而识别草桥片区不同空间的花园城市社区景观生态系统服务特征。在进行聚类之前, 采用R语言中的Calinski指数计算最佳聚类数。

同时, 研究引入社区景观可达性, 探究草桥片区居民对社区景观生态系统服务的获取效率。采用两步移动搜索法, 并引入距离

衰减函数计算社区景观可达性。该方法是一种用来评估各类服务设施的空间可达性的方法, 其结果反映了服务设施对不同区域居民的可达性^[18], 见公式(2)(3)。

$$R_j = \frac{S_j}{\sum_{k \in \{d_{kj} \leq d_0\}} D_k G_{jk}} \quad (2)$$

$$A_i^F = \sum_{j \in \{d_{ij} \leq d_0\}} G_{ij} R_j \quad (3)$$

式中, R_j 为 j 处的服务供需比; S_j 表示 j 处的供给规模; k 表示居民的空间单元; j 为社区景观空间单元; d_{kj} 是从空间单元 k 中心到景观空间元 j 中心的空间距离; d_0 是给定空间距离阈值; D_k 表示 k 处的需求规模; G_{jk} 是景观空间单元 j 的空间作用域内 ($d_k \leq d_0$) 空间单元 k 的人口数量; A_i 为 i 处的服务可达性; i 表示研究区域的空间单元; d_{ij} 是从空间单元 i 中心到景观空间元 j 中心的空间距离; G_{ij} 为 i 处与 j 处的距离衰减函数。

2.4 社区景观生态系统服务与可达性的耦合协调度计算及相关影响因素的探究方法

研究通过耦合协调度模型耦合社区景观综合服务指数及可达性, 探究社区景观生态系统服务供给与获取效率的耦合协同程度。耦合协调度模型可用于描述系统内各个部分之间的相互作用影响, 不仅可以反映系统间的协调程度及耦合程度, 也有助于优化系统的性能和稳定性。耦合协调度模型^[19]涉及耦合度、协调指数以及耦合协调度的计算, 三个指标的值域介于0~1之间。其中耦合协调度越高, 代表各部分耦合程度及协同性越高。

部分研究发现, 生态系统服务与需求和供给水平息息相关, 这反过来又被证明与某些因素存在关联^[20]。作为社区尺度生态系

表1 花园城市社区景观生态系统服务评价体系
Tab. 1 Evaluation system of garden city community landscape ecosystem service

目标层 A Objective layer	准则层 B Criteria layer	指标层 C Indicator layer	评分标准及方法 D Scoring standards and methods
花园城市社区景观生态系统服务评价体系 A	生态环境质量 B1	生境质量指数 C1	InVEST 生境质量模块
	景观韧性 B2	雨洪调节指数 C2	$Q_i = \frac{P_i - 0.2 \times \left(\frac{1000}{CN_i} - 10 \right)^2}{P_i + 0.8 \times \left(\frac{1000}{CN_i} - 10 \right)}$ $FR_i = 1 - \left(\frac{Q_i - Q_{min}}{Q_{max} - Q_{min}} \right)$
		气候调节指数 C3	$SS_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n C_j}$
	绿色空间可用 B3	绿地可用性指 C4	$GAVI_i = \frac{(GS_{NDVI} + GS_{LAI} + GS_{LULCI})}{3}$
	景观空间结构特征 B4	服务连通度 C5	$L = (0.4 \times CT + 0.3 \times DI) + (0.1 \times CT_1 + 0.05 \times LSI_1) + (0.1 \times CT_2 + 0.05 \times LSI_2)$
		服务异质性 C6	$Y = 0.57 \times SHEI + 0.43 \times FRAC-MN$

注： Q_i 代表*i*像元地表径流量 (mm)； P_i 为*i*像元逐日降水量 (mm)； CN_i 代表*i*像元径流系数 (由经验值获取)； FR_i 代表*i*像元雨洪调节指数； SS_i 代表*i*像元气候调节重要性指数，由各气候调节因子加权叠加得出； C_j 代表*j*因素重要性等级值； $GAVI_i$ 代表*i*像元绿地可用性指数； GS_{NDVI} 、 GS_{LAI} 、 GS_{LULCI} 分别代表*i*像元基于NDVI、LAI和土地利用的绿地度量暴露值； L 代表服务连通度，由各景观格局指数计算； CT 代表连通指数； DI 代表分离指数； CT_1 、 CT_2 及 LSI_1 、 LSI_2 分别代表林地与草地的连通指数和形状指数； Y 代表服务异质性，由各景观格局指数计算； $SHEI$ 代表香浓均匀度指数； $FRAC-MN$ 代表平均斑块分形维数。最后将所有指标计算结果归一化到0~1的评分范围内。

统服务获益者的居民，其相关的居住人口等因素可以在一定程度上反映社区中生态系统服务的需求水平^[21]。而作为城市生态系统服务最大的提供者，植被的分布等相关因素可以反映社区中生态系统服务的供给水平^[22]。功能设施作为社会经济因子和人类活动因素的代表，可以明显影响生态系统服务^[23]。因此，考虑到数据可获取性及相关因素对生态系统服务供给与获取效率潜在的影响程度，研究选取居住建筑密度、功能设施密度作为人类社会的代表因素，选取植被归一化指数 (NDVI) 作为植被分布的代表因素。其中功能设施数据主要包含交通站点设施、娱乐设施、医疗卫生设施、教育设施及部分商业

设施，这些设施对居民生活水平起到重要影响。最后，选取合适的分析工具分析影响因素与耦合协调度间的相互关系和影响程度，以期为生态系统服务供给与获取效率的协同提升提供参考。通过分析影响因素与耦合协调度的相关性，探究各因子与耦合协调度的影响关系，并在明确影响关系之后运用随机

森林回归测度影响因子对耦合协调度的重要程度。

3 花园城市社区景观生态系统服务及可达性分析

3.1 社区景观生态系统服务分析及识别

研究收集了30位专家的评分，在修正判断矩阵后得出各指标权重值。之后，结合主成分分析得出的客观权重值，最终形成各指标权重修正值。由表2可知，运用AHP分析的指标权重在生境质量指数、气候调节指数和雨洪调节指数占比较高，三个指标权重占比之和达64%。而运用PCA分析的指标权重在生境质量指数、绿地可用性指数及服务异质性占比较高，三个指标权重占比之和达61%。将两种分析方式的权重结果进行修正之后可知，生境质量指数、气候调节指数和绿地可用性指数贡献率最大，说明生态环境质量和景观韧性是相对重要的因素，对花园城市社区景观生态系统服务的影响程度更高。

基于各类指标评价结果，以归一化的方式进行0~1的评分 (图3)。总体来看，6项指标和各类绿色空间空间的分布趋势大致相似，这说明绿色及灰色空间的分布对指标的评价结果产生很大的影响。生境质量指数和气候调节指数的高值区域集中于研究区外围，以马草河及高速路旁的绿地为主。绿地可用性较好的区域主要为西北侧的路旁绿地及中部贯穿研究区的带状绿地。雨洪调节指

表2 两类方法及修正后的权重
Tab. 2 Two kinds of methods and correction weights

指标 Indicator	C1	C2	C3	C4	C5	C6
AHP 层次分析权重 /%	25	19	20	15	11	10
PCA 主成分分析权重 /%	22	7	16	21	16	18
修正后权重 /%	23	14	18	18	13	14

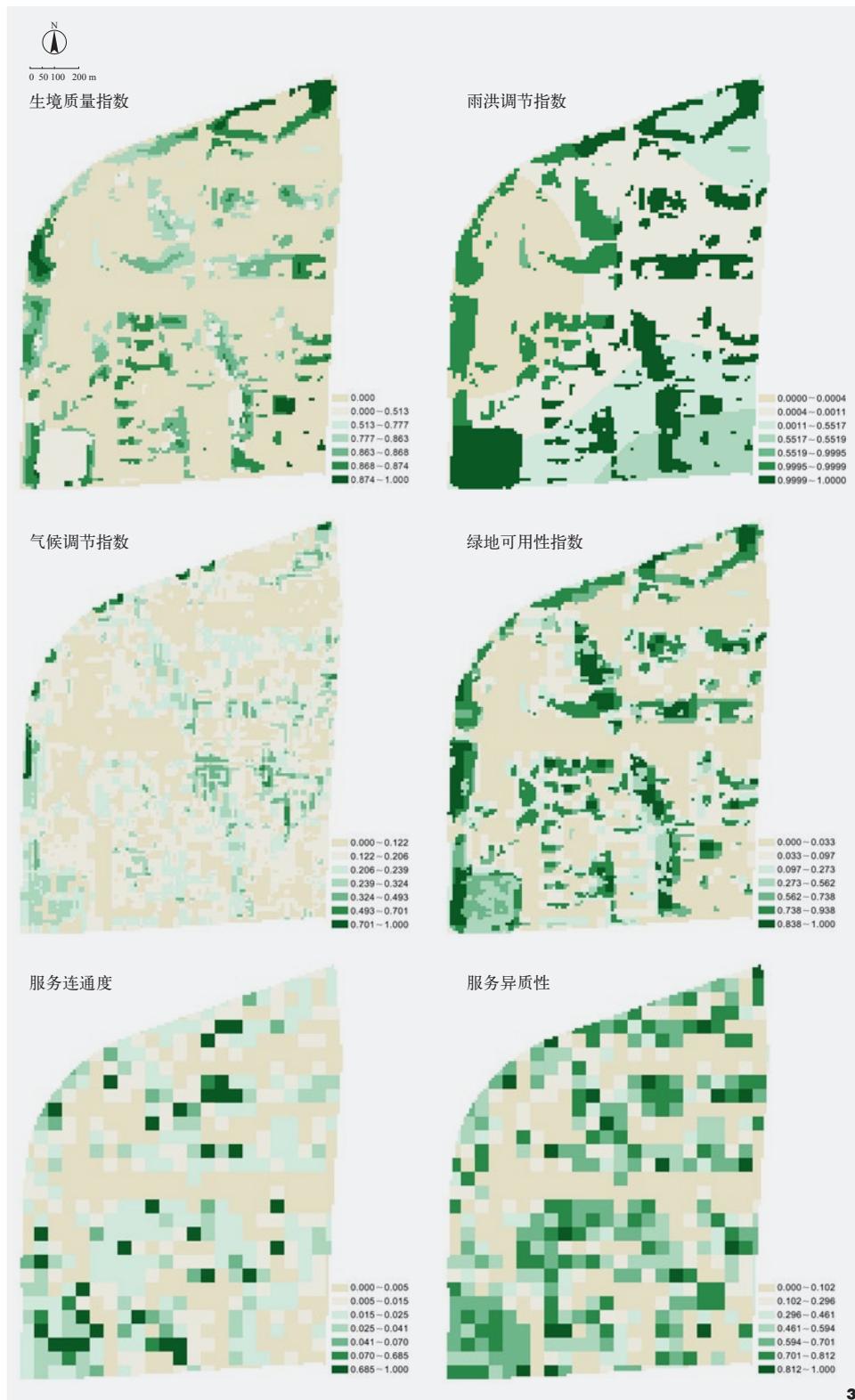
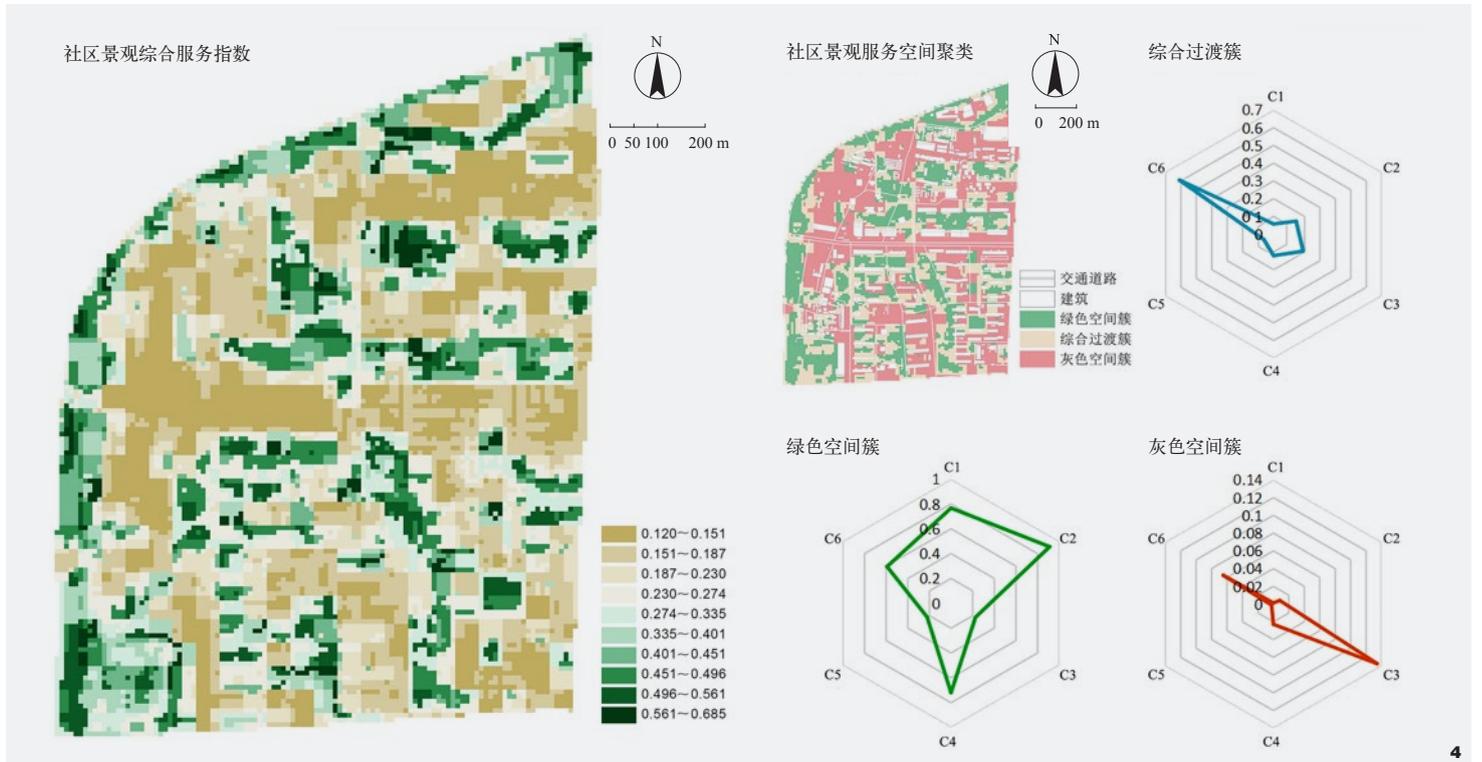


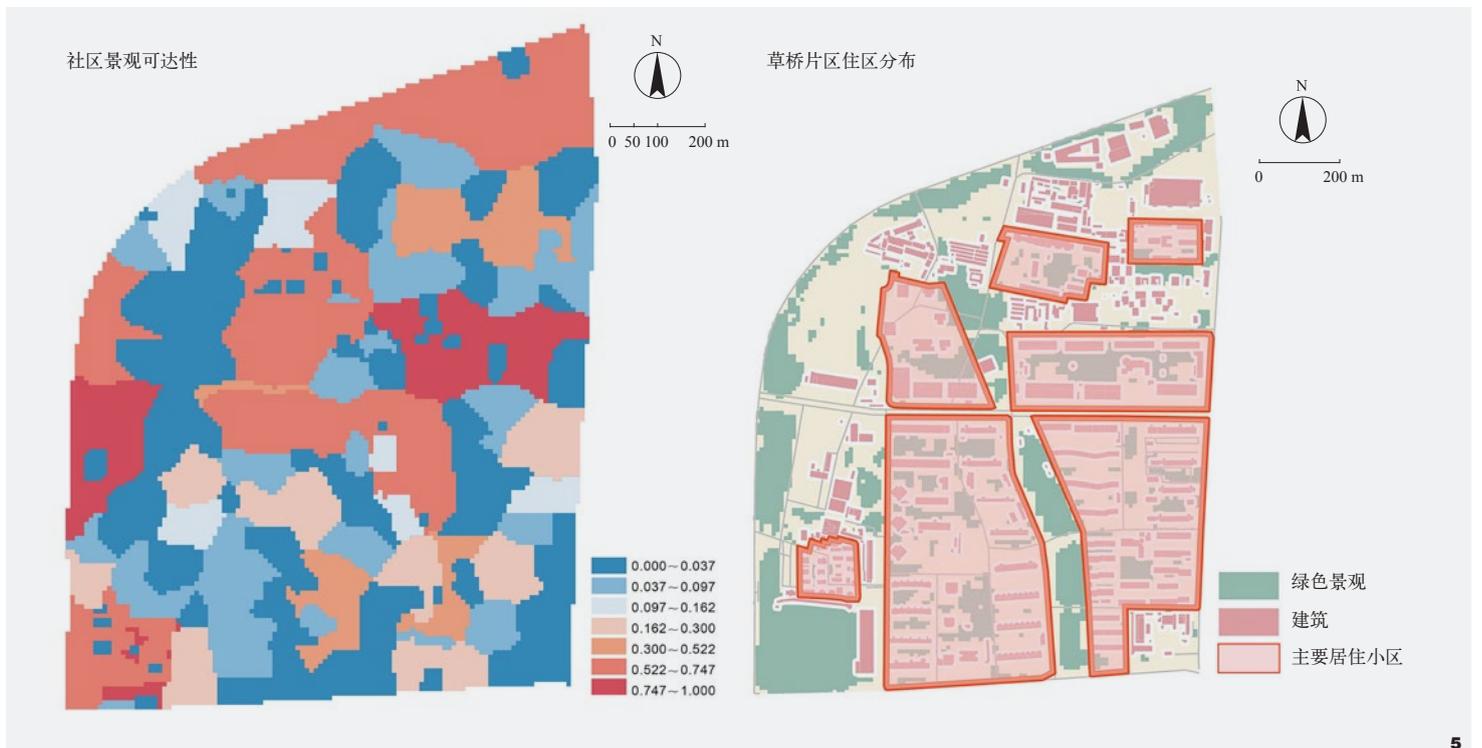
图3 草桥片区相关生态系统服务指标分布特征
Fig. 3 Distribution characteristics of related ecosystem service indicators in Caoqiao area

数则呈现东南高、西北低的趋势，其数据分三段集中，且三段间差别较大。其高值区主要位于绿色空间，说明社区中绿色空间对雨洪调节功能的发挥极其关键。而服务连通度及服务异质性的最高值段更加集中，并分布于片区中连通绿地的几个关键点位，如高尔夫球场、草桥欣园4区和矿冶佳苑的集中绿地等。

为计算社区景观综合服务指数并识别其不同空间特点，结合评分结果及修正后的指标权重将各项指标加权叠加，并通过空间聚类，形成综合服务指数的综合过渡簇、绿色空间簇及灰色空间簇三个空间类型及三类空间各项指标的评分(图4)。由评价结果可知，除了西北侧的带状绿地及竖向贯穿的带状绿地外，草桥欣园1区、4区、矿冶佳苑及草桥东路28号院等社区景观综合服务指数相对较高；草桥欣园3区南部、物美大卖场及大兴国际机场城市航站楼草桥站区域的指数值则相对较低。由综合服务指数的聚类结果可知，绿色空间簇主要为绿地及田地，其C1(0.767)、C2(0.911)、C4(0.718)及C6(0.592)的评分较高，4项指标评分占该簇总体评分的87%。灰色空间簇主要为各类建筑及其他建设用，其各项指标评分为三类生态系统服务簇中最低，C3(0.134)、C6(0.065)的评分相对较高，占该簇总体评分的85%。综合过渡簇的用地类型多样，其各项数据值介于其他两类之间，C3(0.191)、C6(0.608)的评分同样较高，占该簇总体评分的67%。总体来看，绿色空间簇在生态环境质量、景观韧性及绿色空间实用程度方面有较高的服务水平，灰色空间簇及综合过渡簇在气候调节方面也发挥了一定功能，而综合过渡簇的服务异质性为最高，这说明其用地类型丰富，空间可塑性强。



4



5

图4 草桥片区社区景观综合服务指数及聚类结果
Fig. 4 Comprehensive service index and clustering results of community landscape in Caoqiao area

图5 草桥片区社区景观可达性分布特征
Fig. 5 Distribution characteristics of community landscape accessibility in Caoqiao area

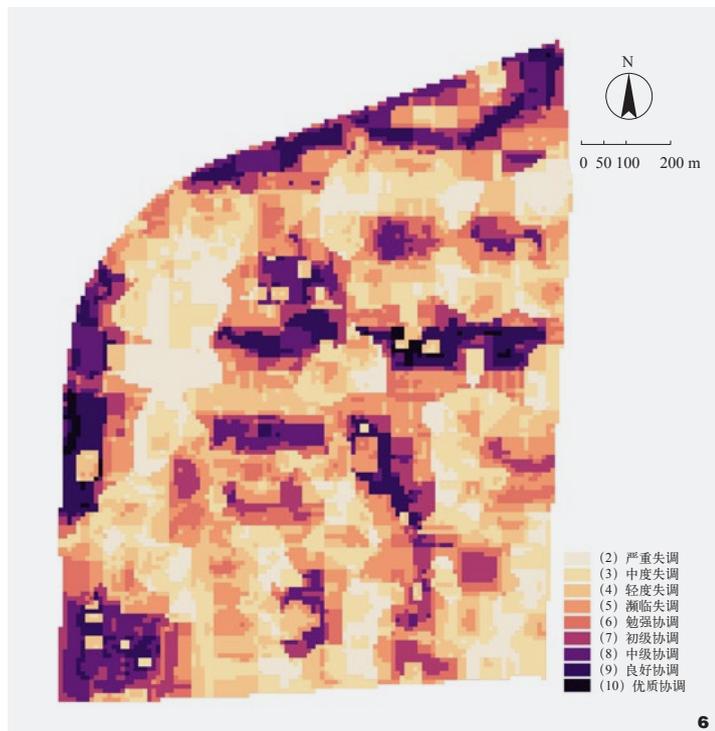


图6 草桥片区相关耦合协调度分级分布特征
Fig. 6 Hierarchical distribution characteristics of correlation coupling coordination degree in Caoqiao area

3.2 社区景观可达性分析

根据可达性分析结果(图5), 可达性总体分布趋势与绿地景观空间分布相似, 但由于人口分布及其他因素的影响, 二者存在一定差异性。研究区中部及西北部道路沿线一带的社区景观可达性较高, 而大兴国际机场城市航站楼草桥站区域较低。对比发现, 分布集中的大型绿地斑块周边的可达性较高, 而孤立的小型绿地斑块及带状绿地对可达性的提升效果有限。空间结构呈局部围合状的绿地斑块同样对应着较高的可达性。主要居住小区的可达性方面, 草桥欣园1区、2区较高, 其大部分空间的可达性评分在0.522以上; 草桥欣园3区及4区相对较低, 其大部分空间的可达性评分在0.3之下; 玫瑰花园小区的可达性本身不高, 评分主要在0.097 ~ 0.162, 但其周边区域与其相反, 呈现高可达性。

4 花园城市社区景观生态系统服务与可达性的耦合协调度及影响因素分析

4.1 社区景观综合服务指数与可达性的耦合协调度分析

通过将花园城市社区相关的各项生态系统服务与其空间结构结

合, 并加入绿地可用性, 形成体现生态系统服务综合效能的指标评价体系。通过分析社区景观可达性及社区景观综合服务指数的耦合协调度, 形成了服务对象的供给能力与需求对象的获取水平的耦合, 这种耦合解释了供给与获取效率的耦合协同关系。耦合协调度的计算及等级划分结果(图6, 表3)表明, 研究区达到勉强协调以上的区域占总体面积的35.25%, 主要集中于社区内部规模较大的集中绿地、社区外围道路沿线的带状绿地及大型的带状公园。这说明这些区域生态系统服务供给与获取效率较高, 是草桥片区居民所享受的相关生态系统服务的主要载体。但总体来看, 失调的区域占比超过协调区域。同时, 田地、大型绿地的外围及多数小型绿地的耦合协调程度呈现濒临失调或轻度失调的状态, 且部分绿地内部受到可达性的影响, 耦合协调度与服务水平呈现互逆的关系。这说明此类区域相关生态系统服务效率较低, 不能起到足够的生态及游憩作用。通过表4结果及空间对比发现, 综合过渡簇与濒临失调和轻度失调区都位于绿色空间及灰色空间之间的过渡区域, 其重合度较高。这表明居民在综合过渡簇的部分空间能够有效获取一定的生态系统服务, 这些空间暗示了生态系统服务和可达性挖掘与提升的潜力。

4.2 耦合协调度的影响因素分析

通过居住建筑密度、功能设施密度、NDVI与耦合协调度之间的皮尔逊相关性分析结果(图7), 可知除NDVI与功能设施密度之外, 其他因素之间皆为显著相关。其中, NDMI与耦合协调度呈显著正相关(相关系数为0.501); 居住建筑密度与耦合协调度之间呈显著负相关(相关系数为-0.293); 功能设施密度与耦合协调度间呈一定程度负相关(相

表3 耦合协调度等级划分
Tab. 3 Grading of coupling coordination degree

指数范围 Range of index	耦合协调等级 Coupling coordination level	耦合协调程度 Coupling coordination degree
0 ~ 0.1	1	极度失调
0.1 ~ 0.2	2	严重失调
0.2 ~ 0.3	3	中度失调
0.3 ~ 0.4	4	轻度失调
0.4 ~ 0.5	5	濒临失调
0.5 ~ 0.6	6	勉强协调
0.6 ~ 0.7	7	初级协调
0.7 ~ 0.8	8	中级协调
0.8 ~ 0.9	9	良好协调
0.9 ~ 1.0	10	优质协调

关系数为-0.047)。

通过随机森林模型计算，模型均方跟误差为0.145，小于耦合协调度的标准差，模型实际值与预测值间的差异相对较小； R^2 为0.522，在0.5以上。这表明模型通过影响因素可以实现对耦合协调度较强的解释。由表5可知，NDVI对耦合协调度的重要程度最大，为60.8%，远远高于其他两类影响因素。这表明NDVI对于耦合协调度影响最大。而居住建筑密度和功能设施密度对耦合协调度的重要程度分别为21.5%和17.7%。

5 花园城市社区景观生态系统服务供给与获取效率的精准提升

为实现花园城市建设背景下草桥片区的社区景观生态系统服务供给与获取效率的提升，研究基于社区景观综合服务指数及可达性的探究结果，在服务功能重要性、服务功能结构性、服务功能可用性等方面提出规划实践策略。(1) 服务功能重要性层面。综合过渡簇不仅可以在生境质量、气候调节等方面发挥一定服务功能，其高异质性也表明用地的空间可塑性。相比公园绿地，此类空间往往与居民生活环境更加重合，因此可以结合花园城市各类生活场景的打造，对其合理利用。新的绿化建设和增补行动也可以着眼于此类过渡空间，通过自然带营建、自然生境花园和绿色会客厅等形式，以点带面地提升社区空间生态环境质量。此外，NDVI对于耦合协调度的高影响程度意味着在绿地建设中对绿地存量的提质增效更为关键。因此，花园城市建设中，应当加强植物再野化管理^[24]，科学引种、合理搭配，从而恢复自然状态下植被群落的密度、三维绿量^[25]及健康状况^[26]。(2) 服务功能结构性层面。耦合协调度分析结果表明，大型绿地斑块对生态

	居住建筑密度	功能设施密度	NDVI	耦合协调度
居住建筑密度	1.000	-0.041 **	-0.277 **	-0.293 **
功能设施密度	-0.041 **	1.000	-0.013	-0.047 **
NDVI	-0.277 **	-0.013	1.000	0.501 **
耦合协调度	-0.293 **	-0.047 **	0.501 **	1.000

注：*代表显著性水平，其中*表示p值小于0.05，**表示p值小于0.01。

图7 各影响因素与耦合协调度间的皮尔逊相关性
Fig. 7 Pearson correlation between influencing factors and coupling coordination degree

表4 社区景观综合服务空间类型的各项指标值
Tab. 4 The index values of spatial types of community landscape comprehensive services

服务空间类型 Service space type	服务指数 Service index	景观可达性 Landscape accessibility	耦合协调度 Coupling coordination degree
综合过渡簇	0.272	0.307	0.475
绿色空间簇	0.474	0.433	0.659
灰色空间簇	0.158	0.249	0.301

表5 各因素对耦合协调度的重要性程度
Tab. 5 Importance of each factor to coupling coordination degree

因素名称 Factor name	因素重要性 / % Proportionment of every factor
居住建筑密度	21.5
功能设施密度	17.7
NDVI	60.8

系统服务的功能发挥最为明显，孤立的斑块则很难提供高效服务水平。同时，研究通过分析不同绿地结构模式的耦合协调度，得出局部围合、串连且形状复杂的绿地结构有利于提升绿地生态系统服务的获取效率。因此在花园城市绿地系统规划中，整个街道片区

应当形成全域分散、局部聚集的绿色空间格局，并在每个社区附近形成大小绿地结合的布局。此外，应当通过绿道和街头游园等带状绿地，将绿化空间接入社区内部，提升绿色空间各项生态过程在社区内外的运转^[27]。(3) 服务功能可用性层面。影响因素分析结

果显示, 居住建筑密度、功能设施密度对耦合协调度呈现负相关, 且居住建筑密度同样与NDMI呈负相关关系。这表明在草桥片区, 居住建筑和功能设施密度越高的区域, 社区景观生态系统服务效率的供给与获取效率和NDMI越低。虽然该结论与部分研究相似^[28-29], 但不能因此判断前者两类因素对生态系统服务的供给与获取效率产生绝对的负面影响。实际上, 部分功能设施在一定程度上对于基于自然的娱乐、文化等生态系统服务的提升起到促进作用^[30], 交通设施与其他服务设施也能促进居民游憩活动的开展。同时, 在高密度城区提高生态系统服务, 完善配套服务功能也是花园城市相关规划的目标之一。因此, 除了降低建筑密度, 将绿色空间的功能设施密度保持在合理范围内, 高密度城区可以通过增加立体绿化以提高三维绿量, 同时见缝插绿地进行社区微花园建设以弥补相关服务的供给能力与可获得性。而新社区在规划建设时则需要留出足够的集中绿地, 建设配套社区公园, 以保证居民享受足够的社区景观生态系统服务。同时, 还应注重建筑及绿地的空间均布性, 以控制建筑之于绿色空间的相对密度。

基于以上策略, 针对不同社区的现状生态系统服务低效的问题, 提出具体的提升措施。在研究区域的主要社区中, 玫瑰花园建筑密度高, 社区绿地占比相对较少。虽然紧邻大型绿地, 但开放程度不足, 且与社区内部联系不紧密。应当通过绿道和小型花园建设打通与周边绿地的联系。草桥欣园2区人口和建筑密度较少, 耦合协调度较高。应当在保持建筑密度的同时, 通过提升植物层次和品质, 利用西侧的未利用地进行自然带营建, 并在西侧与北侧的潜在空间建设生境花园。草桥欣园3区与4区拥有集中绿地, 但硬

质铺装占比较高, 没有形成大范围的绿化空间。应当增加集中绿地区域的绿地占比并与周边小型绿地结合, 形成局部围合的空间结构。此外, 还可以在社区绿地中打造人人参与的“一亩园”, 形成全民共享的花园场景。同时, 应当提升研究区中央带状绿地的地形变化和林木面积, 加强再野化管理, 提高其生境质量及景观韧性。矿冶佳苑、草桥东路28号院及草桥欣园1区的建筑密度较低, 集中绿地的分布相对密集, 形成了不错的生态系统服务获取效率。未来可结合周边用地的退建还绿及老旧建筑改造, 形成小型花园, 连通社区外围空间。在一些商业空间同样可以引入丰富的业态, 打造花园、商业结合体。

6 结语

本研究基于花园城市背景, 创新性地建立了一套社区景观生态系统服务评估指标体系。通过耦合可达性与指标评价结果, 识别并探究不同生态系统服务空间类型的服务低效问题, 并提出一系列提升策略。结果表明: (1) 综合过渡空间的社区景观综合服务指数为0.272, 耦合协调度为0.475。该空间具有一定生态系统服务功能及增质提效潜力, 与生活空间重合度高, 且空间可塑性强, 是用地改造及绿色空间建设的首选。(2) NDMI对于花园城市社区景观生态系统服务与可达性耦合协同的重要性程度最高, 为60.8%, 且为正相关; 居住建筑密度及功能设施密度则相反, 呈负相关。(3) 大型绿地斑块中级协调及以上等级的占比较高, 往往对应生态系统服务与可达性的高耦合协同, 孤立的小型绿地斑块则很难提供高效的服务水平。(4) 局部围合且形状复杂的绿地结构有利于提升社区尺度生态系统服务的获取效率。本研究结果及相关策略有助于丰富花园城市社区景观规划

设计及营建理论, 为生态系统服务供给与获取效率的提升提供了路径及科学依据。研究的指标体系虽然具备一定综合性, 但由于社区尺度相关数据较难获取, 有待收集更准确的数据以形成更丰富、可靠的指标体系。同时, 研究运用InVEST模型进行生境质量的评估, 该模型多用于大尺度区域的研究, 但也有部分小尺度研究采用其生境质量模块进行评估, 对于其是否可以匹配小尺度区域的研究还有待进一步探讨。在影响因素分析时, 居住建筑密度、功能设施密度及NDMI三类因素只是部分主要因素, 其他气候环境及社会经济因素对生态系统服务与可达性二者间耦合协同更深入的影响则需要未来的研究不断跟进和总结深化。▲▲▲

注: 文中图表均由作者绘制。

参考文献

- [1] 李雄, 李方正, 葛韵宇. 绘就首都花园城市高质量发展新图景[J]. 前线, 2024(09): 50-53.
- [2] 陈思. 把首都建设成为一个大花园——访北京市园林绿化局党组书记、局长高大伟[J]. 前线, 2024(09): 54-57.
- [3] 北京市人民政府. 北京花园城市专项规划(2023年-2035年)[EB/OL]. (2024-04-22)[2024-11-03]. https://www.beijing.gov.cn/zhengce/zfwj/zfwj2016/szfwj/202404/t20240425_3638156.html
- [4] WANG L, ZHENG H, CHEN Y, et al. Systematic Review of Ecosystem Services Flow Measurement: Main Concepts, Methods, Applications and Future Directions[J]. *Ecosystem Services*, 2022, 58: 101479.
- [5] HELENA I H, EMMA E, MALIN W, et al. Gardens' Contribution to People and Urban Green Space[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2021, 63: 127198.
- [6] RALF-UWE S, ULRICH W. Spatial Indicators for the Assessment of Ecosystem Services: Providing, Benefiting and Connecting Areas and Landscape Metrics[J]. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 80-88.
- [7] 孙苗苗, 吕江涛, 李晓文, 等. 蓝绿基础设施生态系统服务城乡差异与尺度效应[J/OL]. *应用生态学报*, 1-12(2024-10-08)[2024-11-03]. <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202412.023>

- [8] 郑善文, 祝朝阳, 张珊珊, 等. 基于多源数据支撑的城市中心区绿色空间识别与服务供需评价研究——以北京为例[J]. 城市发展研究, 2024, 31(08): 75-83.
- [9] 陈乾明, 郭青海, 毛齐正. 城市公园生态系统文化服务的空间格局特征及其影响因素研究[J]. 生态学报, 2024(21): 1-15.
- [10] 黄孟冬, 肖玉, 徐洁, 等. 生态系统服务供需关系及空间流动研究进展(英文)[J]. Journal of Resources and Ecology, 2022, 13(05): 925-935.
- [11] 潘芳宏, 胡昂, 干晓宇. 居民的生态系统文化服务需求与公园可达性的关系[J]. 中国城市林业, 2022, 20(01): 36-42.
- [12] 屠星月, 黄甘霖, 郭建国. 城市绿地可达性和居民福祉关系研究综述[J]. 生态学报, 2019, 39(02): 421-431.
- [13] LIANG H L, YAN Q, YAN Y J, et al. Exploring the Provision, Efficiency and Improvements of Urban Green Spaces on Accessibility at the Metropolitan Scale[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 352: 120118.
- [14] CHEN W X, BIAN J J, LIANG J L, et al. Traffic Accessibility and the Coupling Degree of Ecosystem Services Supply and Demand in the Middle Reaches of the Yangtze River Urban Agglomeration, China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2022, 32: 1471-1492.
- [15] XU L Y, YOU H, LI D H, et al. Urban Green Spaces, Their Spatial Pattern, and Ecosystem Service Value: The Case of Beijing[J]. Habitat International, 2016, 56: 84-95.
- [16] 王伟, 赵明. 主成分分析法在航材分类指标体系构建中的应用[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(1): 118-120.
- [17] 杨俊闯, 赵超. K-Means聚类算法研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(23): 7-14.
- [18] LI Z, FAN Z, SONG Y, et al. Assessing Equity in Park Accessibility Using a Travel Behavior-based G2SFCA Method in Nanjing, China[J]. Journal of Transport Geography, 2021, 96: 103179.
- [19] 陈伟忠, 周春应. 中国区域科技金融与技术创新耦合协调度分析[J]. 生产力研究, 2021(6): 113-118.
- [20] PAN H, PAGE J, SHI R, et al. Contribution of Prioritized Urban Nature-based Solutions Allocation to Carbon Neutrality[J]. Nat. Clim. Chang. 2023, 13(8): 862-870.
- [21] 陈光栋. 空间流动视角下珠三角城市群生态系统服务供需均衡研究[D]. 东莞: 东莞理工学院, 2024.
- [22] 张楚晗, 王国玉. 社区蓝绿空间生态系统服务供需研究进展[J]. 风景园林, 2024, 31(12): 121-129.
- [23] 王凯平, 冯悦, 邱陈澜, 等. 环京津城市群生态系统服务的时空演变与驱动因素[J]. 生态学报, 2022, 42(19): 7871-7883.
- [24] 陈杰, 姜霞. 城市绿地空间的再野化及实施途径[J]. 现代园艺, 2024, 47(14): 167-169.
- [25] 徐欣, 张兴, 高飞, 等. 城市公园绿地植被群落郁闭度与三维绿量对夏季降温增湿效应的影响[J]. 中国城市林业, 2024, 22(02): 10-16.
- [26] 朱秋杰. 基于植物健康效益评价的山城步道植物群落景观设计[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
- [27] 黄俊达, 黄金玲, 陈超劲. 以自然保护区为主体的广州市域生态网络构建[J]. 应用生态学报, 2024, 35(01): 247-254.
- [28] 欧阳晓, 王坤, 魏晓. 城乡建设用地关联对生态系统服务的影响——以洞庭湖地区为例[J]. 生态学报, 2022, 42(21): 8713-8722.
- [29] 汤洁, 刘亚修, 庄玉夏, 等. 基础设施建设对长白山森林生态系统服务功能价值的影响[J]. 自然杂志, 2007, 29(2): 91-95.
- [30] 钟敬秋, 高梦凡, 韩增林, 等. 基于生态系统文化服务的人地关系空间重构[J]. 地理学报, 2024, 79(07): 1682-1699.