

DOI: 10.20103/j.stxb.202504020772

马世发, 麦曼铃, 胡跃瀚, 吴玲玲, 蔡云楠. 从空间公平到网络连通: 一种面向城市更新生态回流的土地利用权衡分析框架. 生态学报, 2026, 46(6):

Ma S F, Mai M L, Hu Y H, Wu L L, Cai Y N. From spatial equity to network connectivity: a land use trade-off analysis framework for ecological reversion in urban renewal. Acta Ecologica Sinica, 2026, 46(6):

从空间公平到网络连通: 一种面向城市更新生态回流的土地利用权衡分析框架

马世发, 麦曼铃, 胡跃瀚, 吴玲玲, 蔡云楠*

广东工业大学建筑与城市规划学院, 广州 510090

摘要: 绿地公园是城市可持续发展最为重要的绿色基础设施之一, 其空间分布直接关系到绿色公平。随着我国城镇化发展由高速向高质转变, 如何借助城市更新改善绿色公平是现代人民城市建设的重大需求。然而, 在高密度建成区推进土地利用从灰色空间向绿色空间回流往往面临十分复杂的博弈, 这就亟待构建面向城市更新生态回流的土地利用权衡分析框架。本文依据景观生态学基本原理, 提出了“点位选址促公平、节点串联成廊道、廊道结网全覆盖”的城市更新生态修复空间布局思想, 并耦合中心地和生态网络等理论实现了权衡框架的构建。研究以代表性城市广州中心城区为案例展开实证, 结果表明: (1) 生态斑块“点→线→面”的空间联动是城市更新开展生态修复工程谋局的重要权衡框架; (2) 中心地理论产生的泰森多边形与现实交通可达等时圈高度吻合, 对其进行动态加密可快捷模拟不同空间公平模式下的绿地公园增配中心; (3) 立足城市更新单元空间约束, 在泰森加密节点附近增配绿地公园可改善网络连通性, 进而促进生态服务的高效流动。从空间公平到网络连通是一种重要的生态规划理念, 本研究探索的权衡分析框架具备较高的技术复现性和可靠性, 对生态城市建设具有一定的规划决策参考作用。

关键词: 城市更新; 生态城市; 绿地公园; 生态网络; 绿色公平

From spatial equity to network connectivity: a land use trade-off analysis framework for ecological reversion in urban renewal

MA Shifa, MAI Manling, HU Yuehan, WU Lingling, CAI Yunnan*

School of Architecture and Urban Planning, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090, China

Abstract: Urban parks represent one of the most critical components of green infrastructure, playing an indispensable role in fostering sustainable urban development, with their spatial distribution directly influencing the attainment of green equity. As China's urbanization paradigm undergoes a profound transformation, shifting from a phase of rapid expansion to one focused on high-quality development, the imperative to enhance green equity through strategic urban renewal initiatives has emerged as a major demand of modern people-oriented city construction. However, promoting the transition from grey infrastructure to green space in high-density built-up areas involves complex trade-offs. Thus, developing a dedicated analytical framework to effectively guide ecological restoration processes is critical. Based on the basic principles of landscape ecology, this study proposes a spatial layout idea for ecological restoration within the context of urban renewal. This idea is articulated as a sequential, three-stage progression: beginning with “promoting fairness through urban park location selection,” subsequently advancing to “connecting urban parks into ecological corridors,” and ultimately

基金项目: 国家自然科学基金(41901311); 国家重点研发计划子课题项目(2022YFF1303105-4)

收稿日期: 2025-04-02; **网络出版日期:** 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: caiyn_gdut@163.com

culminating in “achieving coverage of the entire area with an interconnected network of these corridors.” Furthermore, by integrating established theories such as central place theory and ecological network theory, a trade-off framework was developed. To validate the efficacy and applicability of this proposed framework, the central urban area of Guangzhou was selected as a representative case study. The results yielded several key findings: (1) The spatial linkage of ecological patches, progressing from point to line and to area, proved to be a pivotal and essential trade-off framework for the strategic planning of ecological restoration projects within urban renewal contexts; (2) Voronoi polygons generated through the application of central place theory, exhibited a remarkably high degree of consistency with the actual traffic accessibility isochrones. Crucially, the dynamic adjustment and iterative refinement of these polygons enable the rapid and efficient simulation of additional allocation centers for urban parks under a diverse array of spatial equity models; (3) Within the defined constraints of urban renewal units, the strategic addition of urban parks in close proximity to the encrypted Voronoi nodes demonstrably enhanced overall network connectivity, thereby facilitating a more efficient flow of vital ecosystem services. The progression from achieving spatial equity to enhancing network connectivity was a profoundly important and ecologically oriented planning concept. The trade-off analysis framework explored in this study not only exhibits high technical reproducibility and reliability but also offers valuable and actionable reference for planning decisions in the critical domain of ecological city construction.

Key Words: urban renewal; ecological city; urban park; ecological network; green equity

改革开放以来,我国的城镇化得到了飞速发展^[1],但高强度的空间无序开发亦引发了景观破碎化、栖息地退化、生物多样性衰减及生态系统服务功能下降等问题^[2-4]。城市绿地公园作为城市生态系统的核心构成,其既提供休闲娱乐、环境教育等社会服务功能^[5],又承担空气净化^[6]、降温^[7-9]、碳汇增加^[10]等生态服务功能。在高强度人为干预的城市环境中,绿地公园常被视为生态网络中的关键“斑块”或“踏脚石”,对保障城市内部生态过程连续性、维系本土生物种群繁衍与扩散具有不可替代的生态学意义^[11],这一特性使其天然承载着“生态保育”的首要目标。此外,绿地公园作为城市可持续发展的自然基底及人地交互的关键界面^[12],也需满足人类日益多样化的生态福祉保障需求^[13]。因此,绿地公园是现代人民城市建设保障人类生态福祉最为重要的空间载体。

当前,我国城镇化进程已从高速扩张向以存量优化与高质量发展为核心的新阶段^[14]。城市更新作为重塑空间结构、提升人居品质、协调人地关系的核心战略,为弥补历史生态赤字、重构高密度建成区绿地系统提供了契机^[15]。近年来,各地围绕城市更新推进“城市双修”、“三旧”改造、“微更新”等实践^[16-18],但多聚焦点状空间的局部优化,针对绿色公平及生态网络的系统性更新研究仍显不足。在此背景下,通过城市更新重构绿地公园格局以恢复生态功能成为关键命题。相比城市增长将绿色空间开发为灰色空间,本文将城市更新推进灰色空间重置为绿色空间的这一过程定义为“生态回流”,其核心要义是引导城市更新实施生态修复进而增强城市生态系统服务功能。然而,在高密度建成区推进“生态回流”过程中,既有绿地配置方式面临双重目标协同失效的困境:其一,社会功能层面,复杂的土地权属与高昂更新成本制约绿地再供给规模与均衡性,导致空间失衡与环境非正义,挑战居民对生态福祉的公平享有^[19-21];其二,生态保育层面,历史形成的生境破碎化削弱生态网络连通性,阻碍生态系统服务流的畅通,进而影响生态系统服务功能整体发挥^[3]。

上述困境表明,优化绿地公园格局必须在保障社会功能实现的“空间公平性”与支撑生态功能发挥的“网络连通性”之间寻求平衡。空间公平性以供需的空间匹配关系反映居民获取绿色服务的便捷性,强调机会公平与地理均等原则^[22-24]。当前,通过空间可达性评价识别绿色服务薄弱区已成为衡量绿地空间公平性的主流方法^[25-27],常用包括缓冲区分析、核密度估计、网络分析、泰森多边形及两步移动搜索等^[25,28-29]。其中,基于重力模型的两步移动搜索法(2SFCA)因能精细模拟供需关系被广泛应用^[30-32],但存在数据精度要求高、动态响应弱的局限;泰森多边形方法^[33]则因其建模简明、数据依赖度低,更适用于城市更新探索阶段对绿地增

补方案的快速评估。然而,无论采用何种方法进行公平性评估与优化,其基于“点”的决策易形成“生态孤岛”。从城市整体来看,物种遗传传播和种群流动扩散要求生态网络具备景观连通性^[34-35]。因此,构建多尺度生态网络以连接破碎斑块,已成为保护生物多样性和修复生态系统服务功能的重要规划举措^[36]。近年来,图谱理论^[37]、形态学空间格局分析(MSPA)^[38]、最小累积阻力(MCR)模型^[39]、重力模型^[40]、电路理论^[41]等方法被广泛应用于城市生态网络构建,形成了“生态源识别—生态阻力面构建—生态廊道提取”的研究范式。然而,侧重网络连通性的规划方案可能因忽视社会经济成本与居民公平性需求而面临实施困境,甚至可能因追求宏观生态格局“最优”而引发新的空间不公平。由此可见,“生态回流”的核心挑战在于弥合“空间公平”与“网络连通”的割裂,这就亟需构建一个能统筹两者协同增效的整合分析框架。

鉴于此,本文以广州市中心城区为例,依据景观生态学基本原理,提出了“点位选址促公平、节点串联成廊道、廊道结网全覆盖”的城市更新生态修复空间布局思想,并耦合中心地服务和生态网络连通理论实现了权衡分析模型的构建。首先,引入中心地理论构建动态泰森多边形,通过迭代加密模拟不同空间公平模式下的绿地潜在选址范围;其次,立足城市更新单元与泰森加密节点的双重约束增配绿地公园,通过优化“点位”布局优先保障居民对绿色空间的公平可及性;最后,将新增绿地与既有关键绿地视为生态网络核心“节点”,基于电路理论构建城市生态网络,实现节点有效串联增强连通性并提高公平性。空间公平与网络连通的协同旨在实现生态斑块“点→线→面”的空间联动,以生态网络的广域覆盖为最终指向,达成“生态效益全域可达、公平需求全域满足”的联动目标,进而提升城市生态系统的生态效益与社会效益。

1 研究区概况

广州市(112°57′—114°3′E, 22°26′—23°56′N)是中国粤港澳大湾区核心引擎城市与国家中心城市。其地处亚热带季风气候区,年平均气温 22℃,多年平均降雨量 1982.7mm,水热同季且雨量充沛,具备优越的绿地建设自然本底条件。本研究聚焦广州环城高速以内区域(涵盖越秀、天河、海珠、荔湾四区主体区域及白云区、佛山市南海区局部地块),总面积约 222km²,集中了 2023 年全市约 32% 的常住人口与 47% 的 GDP,经济社会要素高度集聚,是我国东部沿海超大城市“高密度开发、新老城区交融”空间形态的典型缩影。尽管该区域绿地建设历史悠长,体系相对完整,但人均公园绿地面积存在严重的空间不均衡问题。在此背景下,《广州市城中村改造专项规划(2021—2035 年)》明确提出“以绿地建设实现开门见绿”的导向,为城市生态空间重塑提供重要契机。然而,受限于老旧城区土地资源的稀缺性,现有城市更新项目中绿地增补与连通性修复的空间协同分析仍存不足,未来亟需通过空间公平与网络连通双维优化破解生态治理难题。因此,本文选取广州环城高速以内区域作为研究区(图 1),紧扣我国超大城市生态空间优化的核心矛盾,对同类城市破解城市生态治理难题具有示范价值与先行探索意义。

2 数据与方法

2.1 数据来源及处理

本文研究数据及来源如下:1)土地利用数据采用中国自然资源部发布的 GlobaLand30 V2020 数据产品(30m 分辨率, <http://www.globallandcover.com>);2)城市更新单元主要根据《广州市城市更新专项规划(2021—2035 年)》(目录和图纸, https://www.gz.gov.cn/zwgk/ghjh/zxgh/content/post_9473584.html),并结合遥感监测与人工核对进行获取;3)树冠高度数据引用世界资源研究所(WRI)与 Meta 联合发布的高分辨率冠层高度图(1m 分辨率; <https://registry.opendata.aws/dataforgood-fb-forests>);4)公园绿地及建筑数据通过立方数据研究院(<https://www.lifangshuju.com/>)等开放平台获取。

2.2 模型和方法

本文通过整合空间公平、网络连通与用地配置三大核心模块,构建了一种面向城市更新生态回流的土地利用权衡分析框架(图 2)。其中,空间公平模块聚焦绿地选址公平性分析,网络连通模块侧重生态网络连通

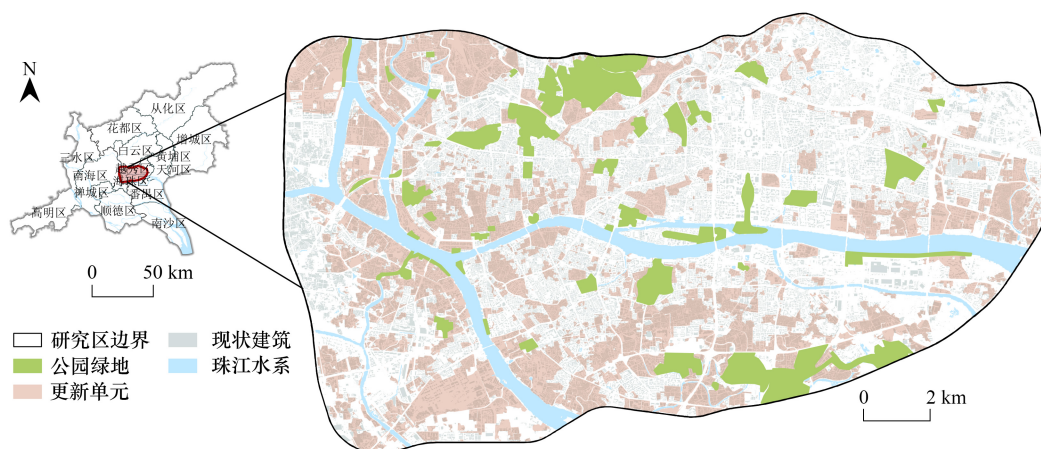


图 1 研究区建成环境现状

Fig.1 Current status of the built environment in the study area

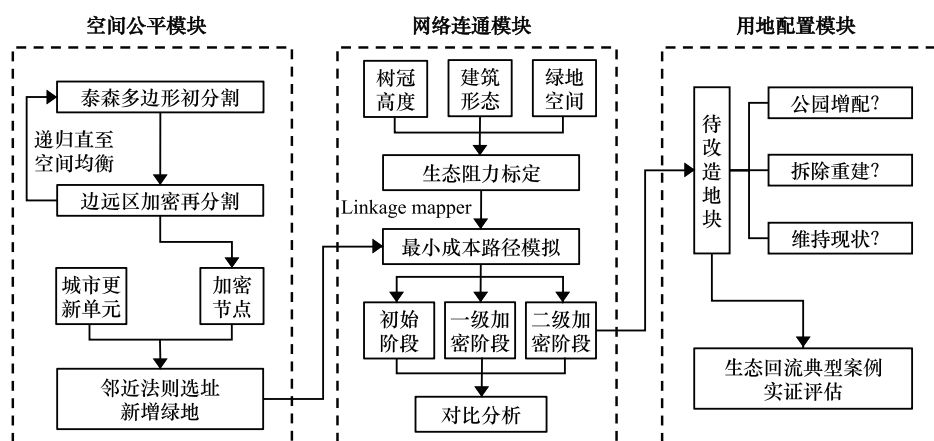


图 2 总体技术路线图

Fig.2 Research technical workflow

性构建,二者共同构成框架的核心分析单元。用地配置模块基于前述分析结果开展典型案例实证评估,旨在验证模拟方案的可行性。主要方法如下:

2.2.1 空间公平模块

为系统性解决绿地公园布局的空间不公平问题,本研究构建了一个基于泰森多边形的动态优化模型。泰森多边形(Voronoi图)是一种基于离散点的空间划分方法,其核心原理是将平面划分为多个多边形区域,使每个区域内的任意点到该区域“种子点”的距离比到其他种子点更近,因此被广泛应用于服务覆盖范围的界定。基于此原理,模型首先通过“泰森多边形初分割”将现状绿地公园的服务范围可视化,其中面积过大的多边形直观地暴露了服务供给不足的薄弱区域。随后,模型针对这些服务薄弱区采用“边远区加密再分割”的递归策略,即在多个面积过大的多边形交汇的共同顶点处增补虚拟绿地节点,并重新计算、分割空间。此过程递归直至空间均衡,即所有泰森多边形面积趋于均等,从而在理论上构建出一个服务机会均等的理想绿地布局。为将理论最优解与现实建设条件相衔接,模型进一步引入“城市更新单元”作为可行的选址载体,并依据最邻近法则,在每个理论加密节点的周边遴选更新单元作为绿地增配潜在选址范围。这一从判断不公平、迭代趋均到邻近落地的技术路径,确保了绿地增补决策既遵循了空间公平原则,又具备了现实可操作性。

2.2.2 网络连通模块

景观阻力面的构建旨在量化空间要素对生态过程的阻碍效应。既有研究多采用多因子综合评价的通用范式构建阻力面,虽具有普适性,却常因指标叠加造成模型冗余问题,难以反映高密度建成区的核心矛盾——“灰色”建筑基质对“绿色”生态空间的物理挤压与分割,已成为制约生态流畅通的核心阻力源。因此,本研究选取建筑形态、树冠高度及绿地空间三个代表性指标量化阻力面的差异化。其中,建筑形态作为建成区最主要的人为干扰源和物理屏障,直接决定空间破碎化程度和物理可达性,是量化“灰色基础设施”阻碍效应的首要因子;树冠高度则突破二维绿地斑块的局限,从三维结构表征生态空间质量,其提供的栖息地与“生态踏脚石”能显著降低流动阻力,是衡量生态功能强弱的关键因子;绿地空间作为生态网络的基础,标定了生态流赖以生存和扩散的基础源地。三者共同构成的阻力评价体系能够反映高密度建成区“强人工干预、弱自然基底”的现实特征。具体构建方法如下:建筑形态阻力系数(R_b)通过综合建筑密度指数(BDI)与垂直拥挤度(VCI)反映立体空间压迫性,按公式(1、2)计算;树冠阻力系数(R_c)按负向关联设计,根据公式(3)反向标准归一化;绿地空间阻力(R_g)结合面积与邻近指数,表征斑块规模及绿地系统对物种扩散、物质能量流动等生态过程的空间阻碍程度(公式4、5)。最终通过公式(6)整合三类阻力因子生成综合景观阻力面,并以生态源与关键生态节点“踏脚石”为基础,利用 ArcGIS 平台的 Linkage Mapper Toolkit 工具箱进行最小成本路径模拟。

$$R_b = 0.5BDI + 0.5VCI \quad (1)$$

$$VCI = \frac{\sigma(H_b)}{\overline{H_b}} \times 100 \quad (2)$$

式中, R_b 为建筑形态阻力系数;BDI 为建筑密度指数;VCI 为垂直拥挤度; $\sigma(H_b)$ 为建筑高度的标准差; $\overline{H_b}$ 为建筑高度的平均值。

$$R_c = 100 - \min\left(100, \frac{H_c}{H_{\max}} \times 100\right) \quad (3)$$

式中, R_c 为树冠高度阻力系数; H_c 为树冠高度; H_{\max} 为区域内树冠高度的最大值。

$$R_g = 100 - \left(0.5 \times \frac{A_g}{A_{\max}} \times 100 + 0.5 \times I_p \times 100\right) \quad (4)$$

$$I_p = \sum_{j \neq i} \frac{A_i \times A_j}{d_{ij}^\beta} \quad (5)$$

式中, R_g 为绿地空间阻力系数; A_g 为绿地面积; A_{\max} 为区域内绿地面积的最大值; I_p 为基于引力模型的绿地连通性指数; A_i 和 A_j 分别为斑块*i*和*j*的绿地面积; d_{ij} 为斑块*i*和*j*之间的欧式距离; β 为距离衰减系数,取值为1。

$$R_z = R_b \times R_c \times R_g \quad (6)$$

式中, R_z 为综合景观阻力系数; R_b 为建筑形态阻力系数; R_c 为树冠高度阻力系数; R_g 为绿地空间阻力系数。

3 结果分析

3.1 生态修复重要节点模拟

本研究通过初始布局、一级加密和二级加密三个阶段的模拟,揭示了生态修复节点布局对服务覆盖范围的动态优化机制,结果见图3和表1。如图3和表1所示,初始阶段节点数量为35个,覆盖密度为0.16个/ km^2 ,节点间平均距离达1.48km,泰森多边形平均面积约为6.42 km^2 且面积变异系数高达60%,表明服务范围存在显著空间异质性;基于1000米缓冲区外的盲区分析显示,研究区61.33%的区域未被有效覆盖。一级加密后节点数量增至39个,覆盖密度提升至0.18个/ km^2 ,泰森多边形平均面积缩减至5.70 km^2 ,但面积变异系数上升至64.21%,反映局部加密集中于特定区域导致空间均衡性受损,此时盲区比例下降至56.29%。二级加密阶段,节点数量进一步增至50个,覆盖密度提升至0.22个/ km^2 ,较初始布局累计增长42.86%,驱动泰森多边形平均面积下降30.47%至4.45 km^2 ,面积变异系数同步降低13.85%至51.69%;同时盲区比例显著缩减

至 43.39%,较初始阶段降幅达 29.25%。数据分析表明,节点数量与覆盖密度的阶梯式提升直接驱动服务盲区面积缩减,其中每增加 10%的节点数量可降低约 4.5%的盲区比例,印证了节点加密对服务范围细密化的空间增益;而泰森多边形面积变异系数的先升后降则揭示出,需通过全域均衡加密策略抑制局部过度聚集引发的空间极化。最后,覆盖盲区比例与泰森参数的双重优化表明,三阶段模拟通过覆盖密度梯度扩张与服务单元均质调控的协同作用,实现了生态修复节点向服务均衡的范式转型,为区域生态廊道构建提供了拓扑优化的空间基底。

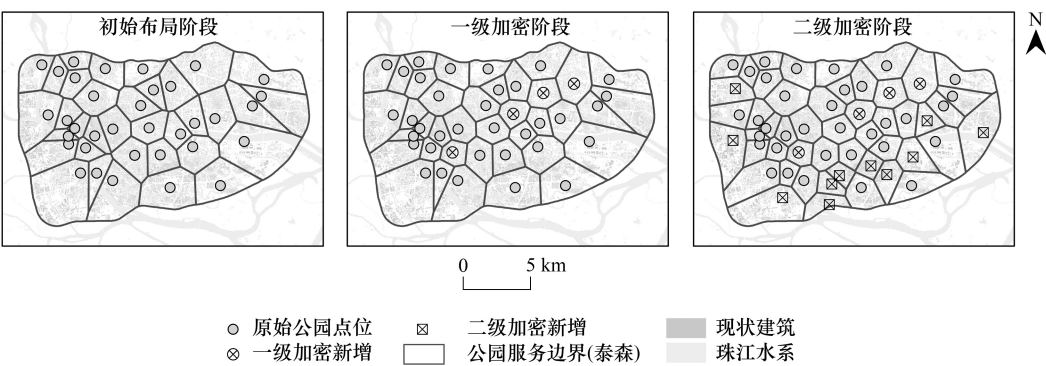


图 3 生态修复重要节点模拟
Fig.3 Simulation of key nodes for ecological restoration

表 1 不同模拟阶段生态修复重要节点布局对比

Table 1 Layout comparison of key nodes for ecological restoration in different simulation stages

模拟阶段 Simulation stage	节点数量 Number of nodes	节点间平均距离 Average distance between nodes/km	节点覆盖密度 Node coverage density/(nodes/km ²)	泰森多边形 平均面积 Average voronoi polygon area/km ²	面积变异系数 Area variation coefficient/%	盲区比例 Blind zone ratio/%
初始布局阶段 Initial Layout Phase	35	1.48	0.16	6.42	60.00	61.33
一级加密阶段 Primary Encryption Phase	39	1.51	0.18	5.70	64.21	56.29
二级加密阶段 Secondary Encryption Phase	50	1.48	0.22	4.45	51.69	43.39

3.2 生态廊道及网络构建

本研究采用基于图论的网络结构指数评估生态网络性能,其中网络闭合度(α)表征用于描述网络中实际通道数与最大可能通道数之比反映网络闭合程度,线点率(β)通过节点平均连接数反映网络复杂度,网络连接度(γ)通过节点连接程度反映网络连通程度,并结合成本比(CR 值)综合判断网络有效性^[40]。图 4 的三阶段模拟结果显示,两级加密策略通过渐进式优化显著提升了网络性能。如表 2 所示,在初始布局阶段,35 个节点与 92 条廊道构成的基础网络 α 指数为 0.84, β 指数 2.63, γ 指数 0.93, CR 值为 0.62,显示网络已具备基础闭合框架但连通效率有限;一级加密后,节点增至 39 个,廊道数量提升至 104 条,促使 α 指数提升至 0.89, β 指数增至 2.67,网络复杂度增强 6.7%, CR 值优化至 0.59,验证路径优选策略效率;至二级加密阶段,节点与廊道数量分别增至 50 个和 149 条, α 指数跃升至 0.96,接近平面网络理论极限 1.0, β 指数突破 2.98, γ 指数提升至 1.04,单节点平均连接超 1 条廊道,标志网络从树状框架转型为多层级闭合拓扑,尽管 CR 值为 0.60,但相较于初始阶段仍降低约 4.3%;两级加密累计驱动 α 指数增长 14.3%, β 指数提升 13.3%, γ 指数提升 11.8%, CR 值降低 4.3%,与此同时,廊道总长度扩展 51.1%至 369.72km,廊道平均长度减少 6.77%至 2.48km,网络覆盖率提升 39.02%。上述结果表明,梯度加密策略通过节点增量与拓扑优化,显著增强生态源地间的闭合性、复杂性、连通性与有效性,使生态源地之间的连接更加紧密和流畅,从而使优化的生态网络更有利于物种迁徙和信息传递。

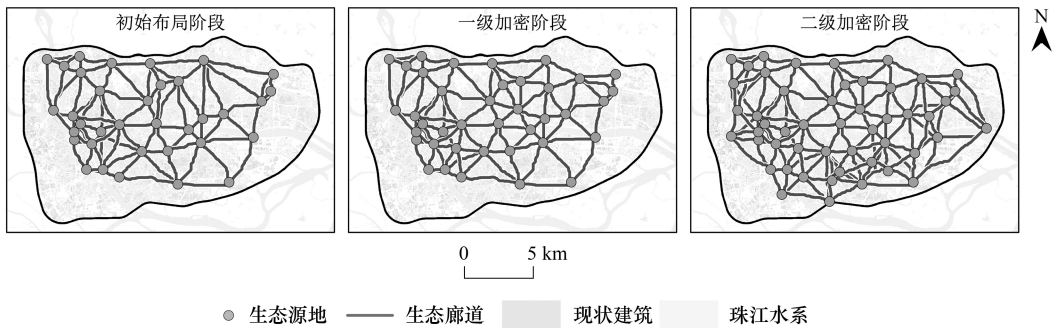


图4 生态廊道及网络构建

Fig.4 Ecological corridor and network construction

表2 不同模拟阶段网络结构差异对比

Table 2 Comparative analysis of network structural variations across simulation stages

模拟阶段 Simulation stage	节点数量 Number of nodes	廊道数量 Number of corridors	廊道总长度 Corridor length/km	廊道平均长度 Average corridor length/km	网络闭合度(α) Network closure degree	线点率(β) Line-point ratio	网络连接度(γ) Connectivity	成本比(CR) Cost ratio	网络覆盖比例 Coverage ratio/%
初始布局阶段 Initial Layout Phase	35	92	244.62	2.66	0.84	2.63	0.93	0.62	32.98
一级加密阶段 Primary Encryption Phase	39	104	255.70	2.46	0.89	2.67	0.93	0.59	33.83
二级加密阶段 Secondary Encryption Phase	50	149	369.72	2.48	0.96	2.98	1.04	0.60	45.85

4 讨论

4.1 中心地理论引导空间均衡的合理性

本文选取流花湖、黄花岗、晓港及珠江公园四个典型节点,通过多尺度等时圈模型验证中心地理论在高密度建成区基础设施配置中的科学价值。研究基于 Mapbox 平台的路径规划算法,通过 OSM 路网数据与实时交通参数模拟,绘制了 15—60 分钟多级步行等时圈,结果如图 5 所示。利用空间叠置分析法对比发现,30 分钟等时圈与泰森多边形服务单元的空间吻合度达到 87.95%。这一结果表明,中心地理论提出的泰森多边形服务单元划分模式能够有效适应高密度建成环境的时空可达性特征,与真实交通网络衍生的服务潜力范围分布高度耦合。相较于传统供需评估模型如两步移动搜索法,中心地理论在规划上的应用优势体现在动态适应性层面。城市更新进程中新增设施的空间时变性与服务边界的模糊性,导致依赖固定供需点的静态评估模型存在根本性局限。泰森多边形通过几何单元的服务范围划分,构建了兼具刚性框架与弹性调节的服务供给机制,有效解决了规划实施周期中“点位不确定性与空间公平性”的辩证矛盾。综上,本文从理论验证与方法两个维度验证了中心地理论引导空间均衡的合理性:在科学层面,通过 15—60 分钟的等时圈模型验证了经典理论的时空适应性;在应用层面,构建了“几何框架+动态调节”的基础设施配置方法。后续研究可引入实时交通大数据与多智能体模拟技术,进一步提升服务单元的空间响应精度,为高密度城区基础设施配置提供更优的决策支持。

4.2 城市更新公园增配可行性分析

本研究的核心贡献在于识别城市更新中公园增配的战略区位,其可行性主要取决于区域特征与修复策略是否匹配,代表性模式如图 6 所示,具体体现为以下四类差异化增配路径:(1) 老旧居住区受用地稀缺与公园服务覆盖不足等现实约束,需匹配“针灸式”修复策略^[42]。具体而言,就是通过空间点穴方式激活街角空地、

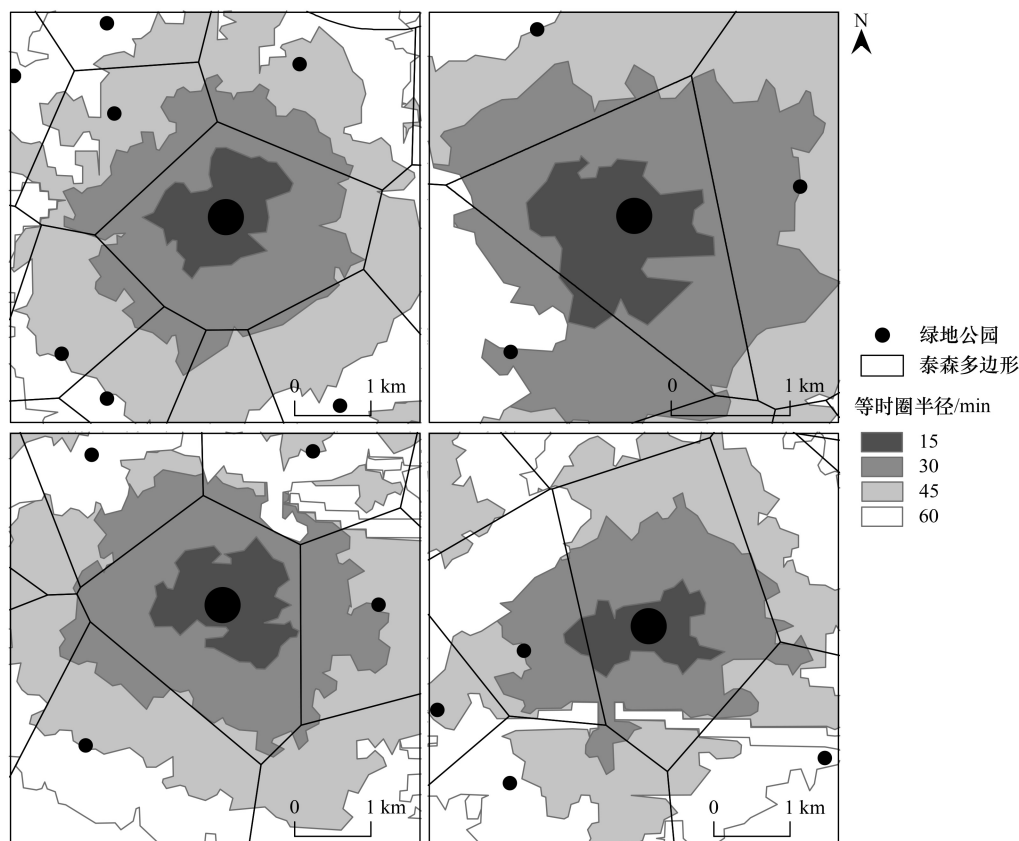


图5 中心地理论服务单元与多尺度等时圈的空间耦合验证

Fig.5 Spatial coupling validation of central place theory service units and multi-scale isochrones

废弃场地等小微闲置空间,通过植入“口袋公园”的模式改善既有公园服务盲区,进而响应居民日常游憩需求;(2)老旧工业区面临棕地闲置与生态修复需求突出的现实挑战,需匹配以生态修复为核心的生态化再生策略,推动工业存量空间的功能转型与生态价值再生^[43]。例如,本模型识别的战略区位包括广钢公园案例,其是一个典型的针对工业棕地进行生态修复的成功案例;(3)城市核心区受限于高密度开发的空间刚性约束,需匹配存量绿地功能挖潜修复策略。该策略主要通过基于自然的解决方案(NbS)优化绿地功能结构,进而提升既有绿地的生态服务功能,从而规避绿地规模扩张的压力^[44];(4)新区边缘地带作为高密度建成区与未开发荒野地的过渡带,需匹配弹性预留的增配策略。针对发展方向尚未明确或更新条件尚未成熟的区域,可引入城市收缩背景下“动态适应型”规划理念,依托自然基底新增一些优质绿地^[45],从而应对传统刚性规划下绿地难以调整的困境^[46-47]。综上可知,本研究制定的绿地公园增配战略可通过“针灸式”织补、生态化再生、存量绿地挖潜、弹性预留等策略实现落地,为城市更新绿地空间优化调控提供了可行性操作方案。

4.3 城市更新生态回流的空间权衡

城市更新实施生态回流面临经济价值与生态效益的博弈均衡^[48]。如图7所示,本文通过房价分布图估算经济损失,揭示增配公园在牺牲土地开发权置换或容积率限制等短期经济收益的同时,如何显著缓解生态失衡风险并强化城市安全本底。以占地25.69公顷的广钢公园为例,参照区域土地拍卖均价与规划容积率核算,其潜在经济价值损失达228亿元。既有研究表明,社区级绿化比例每提高1%可驱动房价上升0.46%^[49],据此推算广钢公园建成后可使周边房价每1m²增值约7435元,总涨幅达21.56%。结合周边住宅地块164.41万m²规划总建筑面积计算,广钢公园建设完成后对周边房产可产生122.2亿元的经济增值效益,对前期潜在经济损失的覆盖比例达53.6%,这说明在关键节点实施生态空间回流可通过邻里土地增值的方式反哺土地财政。除了土地经济增值的直接反哺,生态回流的更重要价值还体现在长期生态效益。评估显示,参照《城市

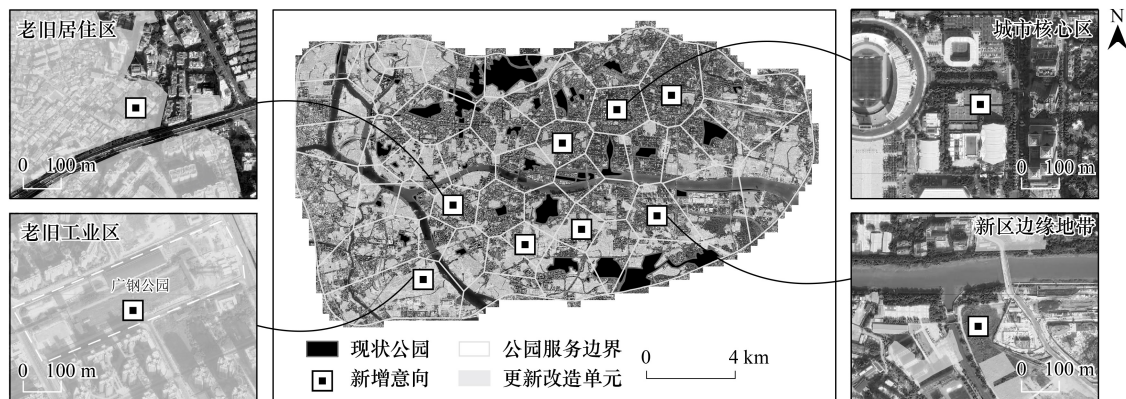


图 6 城市更新公园增配可行性分析

Fig.6 Feasibility analysis of park addition in urban renewal

绿地碳汇项目方法学》基准测算,广钢公园全生命周期 50 年累计碳汇价值达 20 万元;理论降温幅度可达 0.64°C , 每日吸收 205.5MJ 热量,等效于 22864 台千瓦级空调运行效能,降噪能力覆盖 5—15dB 区间^[50]。此外,城市绿地能够通过植物茎叶等结构吸附并滞留空气中的颗粒物,从而显著降低其浓度,具体表现为 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 分别降低 25% 和 37%^[51]。除了气候调节,城区公园更承载着本地区 50% 哺乳鸟类、40% 蝴蝶物种及 60% 两栖动物物种的栖息功能,在生态多样性保护中占据枢纽地位^[52]。综上,城市更新生态回流的空间权衡本质上是短期经济利益与长期生态增益的决策优化,城市治理需以全生命周期视角客观审视土地增值与生态效益的权衡关系。本研究为高密度城市提供了兼顾经济理性与生态安全的空间治理范式,为“绿水青山就是金山银山”等新发展理念如何在老旧城区落地实践也提供了相关参考。

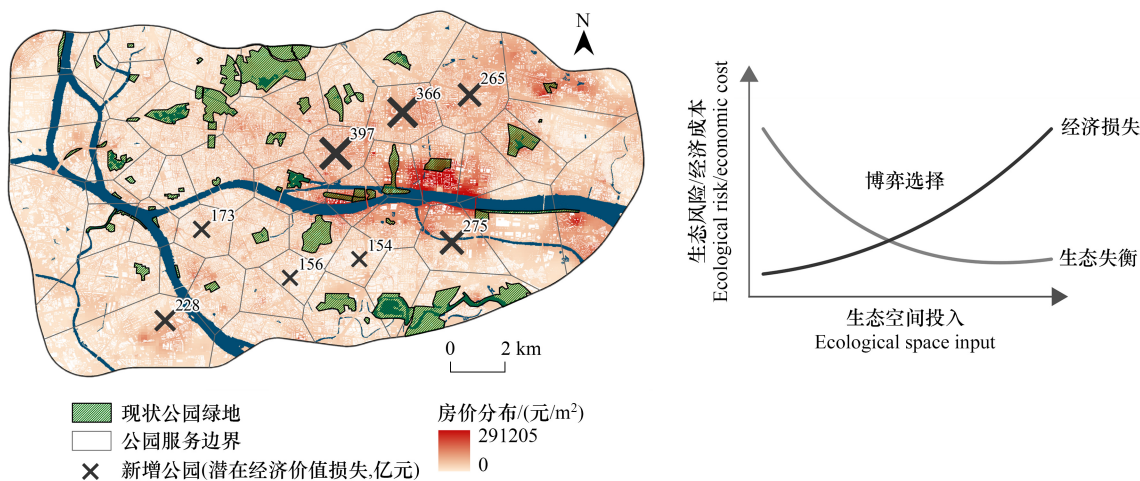


图 7 城市更新生态回流的空间权衡

Fig.7 Spatial trade-offs of ecological reintroduction in urban renewal

5 结论

从空间公平到网络连通是一种重要的生态城市规划理念,本研究以此为基础构建了一种面向城市更新生态回流的土地利用权衡分析框架,旨在回应城市更新生态修复面临的空间规划决策难题。研究表明:(1)生态斑块“点→线→面”的有机联动机制是破解高密度城区生态孤岛效应的有效路径;(2)中心地理论生成的泰森多边形与交通等时圈覆盖范围高度吻合,其动态加密机制可模拟不同空间公平模式下的绿地选址范围,为

锚定城市更新生态修复关键区提供了技术支撑;(3)基于泰森加密节点增配的绿地公园可显著提升生态网络的连通性,进而驱动生态系统服务流动效率的整体提升;(4)生态回流的经济成本与生态效益存在显著的时空异质和互补性,即短期可能面临一定的损失但长期可获得土地价值的整体增益,换言之,城市更新土地利用配置要具备长效发展思维。

本研究的理论贡献在于提出“公平—连通”协同的生态修复范式,通过动态泰森加密机制衔接空间均衡目标与网络拓扑优化需求,为高密度城市更新破解“公平失衡—连通失效”的二元困境提供了方法论创新。实践层面,建议将生态网络连通性提升纳入城市更新成本效益评估体系,通过容积率转移、生态补偿等政策工具引导市场主体参与绿地共建,实现生态安全与土地增值的良性互动。然而,城市是一个超级复杂的人地耦合系统,一个微小的不确定性也能引起系统性变革,城市更新规划要远比新城白地建设难度大,未来可进一步耦合社会感知数据与生态过程模型,探索精细尺度下“人—地—生”的协同优化和动态治理机制。

参考文献(References):

- [1] Dadashpoor H, Azizi P, Moghadasi M. Land use change, urbanization, and change in landscape pattern in a metropolitan area. *Science of The Total Environment*, 2019, 655: 707-719.
- [2] Montesino Pouzols F, Toivonen T, Di Minin E, Kukkala A S, Kullberg P, Kuusterä J, Lehtomäki J, Tenkanen H, Verburg P H, Moilanen A. Global protected area expansion is compromised by projected land-use and parochialism. *Nature*, 2014, 516(7531): 383-386.
- [3] Babí Almenar J, Bolowich A, Elliot T, Geneletti D, Sonnemann G, Rugani B. Assessing habitat loss, fragmentation and ecological connectivity in Luxembourg to support spatial planning. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 189: 335-351.
- [4] Wang R, Zhu Q C, Zhang Y Y, Chen X Y. Biodiversity at disequilibrium: updating conservation strategies in cities. *Trends in Ecology & Evolution*, 2022, 37(3): 193-196.
- [5] Byrne J, Wolch J. Nature, race, and parks: past research and future directions for geographic research. *Progress in Human Geography*, 2009, 33(6): 743-765.
- [6] Jim C Y, Chen W Y. Assessing the ecosystem service of air pollutant removal by urban trees in Guangzhou (China). *Journal of Environmental Management*, 2008, 88(4): 665-676.
- [7] Bowler D E, Buyung-Ali L, Knight T M, Pullin A S. Urban greening to cool towns and cities: a systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 97(3): 147-155.
- [8] Masoudi M, Tan P Y. Multi-year comparison of the effects of spatial pattern of urban green spaces on urban land surface temperature. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 184: 44-58.
- [9] Ramyar R, Ackerman A, Johnston D M. Adapting cities for climate change through urban green infrastructure planning. *Cities*, 2021, 117: 103316.
- [10] Strohbach M W, Haase D. Above-ground carbon storage by urban trees in Leipzig, Germany: Analysis of patterns in a European city. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 104(1): 95-104.
- [11] Dong J, Guo F, Lin M X, Zhang H C, Zhu P S. Optimization of green infrastructure networks based on potential green roof integration in a high-density urban area—a case study of Beijing, China. *Science of The Total Environment*, 2022, 834: 155307.
- [12] Semeraro T, Scarano A, Buccolieri R, Santino A, Aarrevaara E. Planning of urban green spaces: an ecological perspective on human benefits. *Land*, 2021, 10(2): 105.
- [13] Pinto L V, Inácio M, Santos Ferreira C S, Ferreira A D, Pereira P. Ecosystem services and well-being dimensions related to urban green spaces: A systematic review. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 85: 104072.
- [14] 樊杰, 赵艳楠. 面向现代化的中国区域发展格局:科学内涵与战略重点. *经济地理*, 2021, 41(1): 1-9.
- [15] Zhu H, Gao X, Tian W Y, Wei M Y, Zhang X M, Chen Y Y. Investigating the mechanisms of sustainable urban land renewal: a perspective of spatial development rights. *Sustainable Cities and Society*, 2024, 109: 105536.
- [16] 王承华, 张进帅, 姜劲松. 微更新视角下的历史文化街区保护与更新——苏州平江历史文化街区城市设计. *城市规划学刊*, 2017, (6): 96-104.
- [17] 杨廉, 袁奇峰. 珠三角“三旧”改造中的土地整合模式——以佛山市南海区联滘地区为例. *城市规划学刊*, 2010, (2): 14-20.
- [18] 倪敏东, 陈哲, 左卫敏. “城市双修”理念下的生态地区城市设计策略——以宁波小浃江片区为例. *规划师*, 2017, 33(3): 31-36.
- [19] Jennings V, Johnson Gaither C, Gragg R S. Promoting environmental justice through urban green space access: a synopsis. *Environmental Justice*, 2012, 5(1): 1-7.
- [20] Wolch J R, Byrne J, Newell J P. Urban green space, public health, and environmental justice: The challenge of making cities ‘just green enough’. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 125: 234-244.

- [21] Das D K. Factors and strategies for environmental justice in organized urban green space development. *Urban Planning*, 2022, 7(2): 160-173.
- [22] Dadashpoor H, Rostami F, Alizadeh B. Is inequality in the distribution of urban facilities inequitable? Exploring a method for identifying spatial inequity in an Iranian city. *Cities*, 2016, 52: 159-172.
- [23] Pritchard J P, Tomasiello D B, Giannotti M, Geurs K. Potential impacts of bike-and-ride on job accessibility and spatial equity in São Paulo, Brazil. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2019, 121: 386-400.
- [24] Kelobonye K, Zhou H, McCarney G, Xia J H. Measuring the accessibility and spatial equity of urban services under competition using the cumulative opportunities measure. *Journal of Transport Geography*, 2020, 85: 102706.
- [25] 刘常富, 李小马, 韩东. 城市公园可达性研究——方法与关键问题. *生态学报*, 2010, 30(19): 5381-5390.
- [26] 尹海伟, 孔繁花, 宗跃光. 城市绿地可达性与公平性评价. *生态学报*, 2008, 28(7): 3375-3383.
- [27] Pearsall H, Eller J K. Locating the green space paradox: a study of gentrification and public green space accessibility in Philadelphia, Pennsylvania. *Landscape and Urban Planning*, 2020, 195: 103708.
- [28] Laatikainen T E, Piironen R, Lehtinen E, Kyttä M. PPGIS approach for defining multimodal travel thresholds: Accessibility of popular recreation environments by the water. *Applied Geography*, 2017, 79: 93-102.
- [29] 宋正娜, 陈雯, 张桂香, 张蕾. 公共服务设施空间可达性及其度量方法. *地理科学进展*, 2010, 29(10): 1217-1224.
- [30] 岳邦佳, 林爱文, 孙铖. 基于 2SFCA 的武汉市低收入者公园绿地可达性分析. *现代城市研究*, 2017(8): 99-107.
- [31] 全德, 孙裔煜, 谢苗苗. 基于改进高斯两步移动搜索法的深圳市公园绿地可达性评价. *地理科学进展*, 2021, 40(7): 1113-1126.
- [32] Huang L Y, Lu Y, Wang J. Linking G2SFCA method and circuit theory to promote spatial equity and landscape connectivity in urban ecological infrastructure. *Journal of Environmental Management*, 2023, 348: 119208.
- [33] Wang C P, Yang Y X, Li G T, Yan S Y. Evaluation and division methods of coupled spatial units between parks and living circles: a case study of four national-level new areas. *Buildings*, 2024, 14(8): 2493.
- [34] Jangjoo M, Matter S F, Roland J, Keyghobadi N. Connectivity rescues genetic diversity after a demographic bottleneck in a butterfly population network. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(39): 10914-10919.
- [35] Sork V L, Smouse P E. Genetic analysis of landscape connectivity in tree populations. *Landscape Ecology*, 2006, 21(6): 821-836.
- [36] Jongman R. Ecological networks are an issue for all of US. *Journal of Landscape Ecology*, 2008, 1(1): 7-13.
- [37] Zetterberg A, Mörtberg U M, Balfors B. Making graph theory operational for landscape ecological assessments, planning, and design. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 95(4): 181-191.
- [38] 汪勇政, 李久林, 顾康康, 陆林. 基于形态学空间格局分析法的城市绿色基础设施网络格局优化——以合肥市为例. *生态学报*, 2022, 42(5): 2022-2032.
- [39] 陈南南, 康帅直, 赵永华, 周煜杰, 闫瑾, 卢雅茹. 基于 MSPA 和 MCR 模型的秦岭(陕西段)山地生态网络构建. *应用生态学报*, 2021, 32(5): 1545-1553.
- [40] 张乐相, 柴波, 张岩, 何文清, 谭秀全. 基于重力模型与电路理论的生态网络对比研究——以济宁市为例. *生态学报*, 2025, 45(4): 1684-1696.
- [41] Huang L Y, Wang J, Fang Y, Zhai T L, Cheng H. An integrated approach towards spatial identification of restored and conserved priority areas of ecological network for implementation planning in metropolitan region. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 69: 102865.
- [42] 袁芯. 基于“城市针灸”原理的生态空间品质提升路径研究——以上海市静安区为例. *上海城市规划*, 2018, (2): 102-109.
- [43] 邓位. 城市更新概念下的棕地转变为绿地. *风景园林*, 2010, (1): 93-97.
- [44] Chen S Y, Qiu J, Yang M. Addressing the green space management challenges of the Park City in China: How can nature-based solutions contribute? *Environmental Development*, 2025, 55: 101235.
- [45] 周聪惠, 宋鑫鑫. 城市收缩背景下绿地规划的关键问题及工作框架研究. *国际城市规划*, 2025: 1-15. (2025-05-20). <https://link.cnki.net/urlid/11.5583.TU.20250519.1644.002>.
- [46] García-García M J, Christien L, García-Escalona E, González-García C. Sensitivity of green spaces to the process of urban planning. Three case studies of Madrid (Spain). *Cities*, 2020, 100: 102655.
- [47] Nor A N M, Corstanje R, Harris J A, Brewer T. Impact of rapid urban expansion on green space structure. *Ecological Indicators*, 2017, 81: 274-284.
- [48] 金贵, 郭柏枢, 成金华, 邓祥征, 吴 锋. 基于资源效率的国土空间布局及支撑体系框架. *地理学报*, 2022, 77(3): 534-546.
- [49] Ben S L, Zhu H, Lu J J, Wang R F. Valuing the Accessibility of Green Spaces in the Housing Market: A Spatial Hedonic Analysis in Shanghai, China. *Land*, 2023, 12(9): 1660.
- [50] 苏泳娴, 黄光庆, 陈修治, 陈水森, 李智山. 城市绿地的生态环境效应研究进展. *生态学报*, 2011, 31(23): 302-315.
- [51] Sribinowska M, Andova V, Mateska A K, Krstevska M C. The effect of small green walls on reduction of particulate matter concentration in open areas. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 279: 123306.
- [52] Cornelis J, Hermly M. Biodiversity relationships in urban and suburban parks in Flanders. *Landscape and Urban Planning*, 2004, 69(4): 385-401.