

基于碳汇效能提升的智慧园林多目标优化配置策略研究

杨 峰

中南林业科技大学涉外学院 湖南 长沙 410211

【摘要】：城市园林碳汇效能提升是低碳城市建设的关键路径，但传统园林规划多侧重景观功能，对碳汇效益的定量优化关注不足。本研究构建了基于碳汇效能提升的智慧园林多目标优化配置策略框架，旨在实现碳汇效能、生态效益与建设成本的协同优化。研究首先基于多源遥感数据识别研究区园林碳汇效能的空间分异特征与优化潜力；进而构建以碳汇效能最大化、景观连通性最优和建设成本最小化为目标的多目标优化模型，采用非支配排序遗传算法（NSGA-II）求解帕累托最优配置方案，并设置多情景对比模拟；最终生成空间导向的优化配置策略。研究结果表明，多目标优化方法能在显著提升碳汇效能的同时兼顾生态效益与经济可行性，为智慧园林规划提供科学决策工具，可为低碳城市导向下的绿地系统规划、园林精细化管理和碳汇增量评估提供方法支撑与实践参考。

【关键词】：碳汇效能；智慧园林；多目标优化；配置策略；低碳城市

DOI:10.12417/3041-0630.26.06.090

引言

城市园林是城市生态系统的重要组成部分，在固碳释氧、调节微气候等方面发挥着不可替代的作用。随着“双碳”战略深入推进，提升城市园林碳汇效能成为低碳城市建设的关键。但传统园林规划侧重景观美学与游憩功能，对碳汇效益的定量优化不足，难以实现碳汇效能、生态效益与经济成本的协同优化。

近年来，学者们围绕城市绿地碳汇开展了大量研究：唐婧楠（2025）探讨了哈尔滨城市绿地形态与碳汇效能的响应关系；周正（2024）提出分层固碳路径法，为碳汇评估提供新思路；靖玉明（2024）研究表明多目标协同优化可提升生态系统效能；Giang等（2018）展示了多目标优化在碳足迹削减领域的应用潜力。上述研究提供了方法借鉴，但针对城市园林空间配置、以碳汇为核心目标的多目标优化研究仍较有限。基于此，本研究构建智慧园林多目标优化配置框架，为园林规划与管理提供科学支撑。

1 多目标优化框架构建与基础条件分析

1.1 智慧园林多目标优化配置的理论基础

（1）城市园林碳汇效能的内涵与评价维度：碳汇效能指单位面积城市园林单位时间内固定的二氧化碳总量（ $tCO_2e/ha \cdot a$ ），综合反映植被类型、群落结构等因素的影响。其评价维度包括单位面积碳汇强度、碳汇总量、碳汇稳定性及碳汇潜力，全面衡量园林固碳能力与提升空间。

（2）多目标优化理论与智慧园林技术特征：多目标优化基于帕累托最优概念，在相互冲突的目标间寻求权衡解，已应用于城市土地利用、生态网络构建等领域，但在碳汇导向的园

林配置中仍处于探索阶段。智慧园林融合物联网、大数据等技术，具备监测、分析、决策、调控闭环能力，核心支撑碳汇动态监测、优化方案生成等环节，本研究聚焦优化决策环节，借助智能算法实现碳汇最优配置。

（3）碳汇效能与其他园林功能的协同与权衡：城市园林承载碳汇、降温、生物多样性保护等多重功能，存在复杂协同与权衡关系。如乔灌草复层群落碳汇与降温效能高，但建设养护成本高；草坪绿地成本低、开放性好，但碳汇效能低。多目标优化需在各功能间寻求平衡，避免单一目标导向的生态风险。

1.2 多目标优化配置的技术框架与指标体系

本研究构建“基础数据层-现状评估层-模型构建层-策略应用层”四级技术路线：整合多源数据，分析碳汇空间分异与优化潜力，构建多目标优化模型并求解，最终转化为空间导向的配置策略。

（1）目标层与约束层设定：优化目标包括三方面：碳汇效能最大化（以年碳汇总量为目标函数）、景观连通性最优（采用IIC和PC指数表征）、建设成本最小化（含苗木、土地整理、养护成本）。约束条件涵盖土地资源（绿地总面积、单块斑块阈值）、政策法规（符合各类规划强制指标）、成本（总预算上限）、生态阈值（乔木、乡土树种比例等）。

（2）变量层定义：优化变量包括绿地类型（公园、防护、附属、生产绿地）、树种配置（乔灌草比例、乡土与速生树种构成）、空间布局（新增绿地位置规模、碳汇廊道宽度等），为模型求解提供核心参数。

1.3 研究区现状碳汇效能与优化基础评估

本研究选取长沙市主城区为研究区(总面积 456km²)，现状绿地总面积 6561ha，绿地率 14.4%，其中公园绿地 1892ha、防护绿地 1156ha、附属绿地 2450ha、生产绿地 386ha、其他绿地 677ha，绿地分布不均衡。

(1) 碳汇效能空间分异与类型差异：基于多源遥感监测，研究区碳汇效能分为五级：极低碳汇区 (<2.0 tCO₂e/ha) 占 18.2%，低碳汇区 (2.0-4.0 tCO₂e/ha) 占 27.6%，中碳汇区 (4.0-6.0 tCO₂e/ha) 占 23.5%，高碳汇区 (6.0-8.0 tCO₂e/ha) 占 19.8%，极高碳汇区 (>8.0 tCO₂e/ha) 占 10.9%。不同绿地类型碳汇效能差异显著，具体统计如下表所示：

绿地类型	面积 (ha)	平均碳汇效能(tCO ₂ e/ha)	碳汇总量 (万 tCO ₂ e)	主要植被类型
公园绿地	1892	5.8	10.97	乔灌木复层群落
防护绿地	1156	4.2	4.86	乔木纯林为主
附属绿地	2450	3.1	7.60	草坪、疏林草地
生产绿地	386	2.5	0.97	苗圃、幼龄林
其他绿地	677	4.5	3.05	自然山体、水体周边
合计	6561	4.1	27.45	—

由表可知，公园绿地平均碳汇效能最高，生产绿地最低，总碳汇量达 27.45 万 tCO₂e/a，绿地类型的结构差异是影响区域整体碳汇效能的重要因素。

(2) 问题诊断与优化潜力：现状主要问题：碳汇效能空间分异显著，中心城区低于外围；附属绿地占比高但碳汇低；绿地破碎化、连通性不足；单一树种和草坪占比过高。优化潜力集中在低效高潜力区 (<4.0 tCO₂e/ha，具备改造条件)，面积 2450ha (占 37.3%)，通过改造碳汇效能可提升 30%以上。

2 基于多目标优化的园林配置模型构建

2.1 多目标优化模型的数学表达与算法选型

(1) 模型构建：多目标优化模型数学形式为： $\min/\max F(x)=[F_1(x),F_2(x),F_3(x)]$ ，受不等式与等式约束， x 为决策变量向量。其中， F_1 (碳汇最大化) = $\sum A_i \cdot C_i$ (A_i 为网格绿地面积， C_i 为单位碳汇效能)； F_2 (连通性最优) = $IIC+PC$ (IIC、PC

为连通性指数)； F_3 (成本最小化) = $\sum (C_{cap,i}+C_{land,i}+C_{main,i})$ (各类成本总和)。约束条件包括绿地总面积、乔木比例 ($\geq 40\%$)、乡土树种比例 ($\geq 70\%$) 等。

(2) 算法选型与改进：采用非支配排序遗传算法 (NSGA-II) 求解，其核心机制包括快速非支配排序、拥挤度距离计算、精英保留策略。针对研究特点改进：采用 30m×30m 网格化编码，基于现状绿地生成初始种群，设置自适应交叉变异概率提升收敛效率。

2.2 优化变量参数化与情景设计

将研究区划分为 30m×30m 网格单元 (共 506700 个)，每个单元赋予类型、植被、碳汇等属性，决策变量为绿地类型与树种配置方案。基于研究区常见树种调查数据，构建 4 类配置方案，明确各类方案的碳汇系数、成本等核心参数，具体如下表所示：

配置类型	碳汇系数 (tCO ₂ e/ha·a)	乔木占比	乡土树种占比	建设成本(万元/ha)	养护成本(万元/ha·a)
乔木主导型	8.2-10.5	$\geq 70\%$	$\geq 80\%$	25-35	1.2-1.8
乔灌混合型	6.5-8.5	40-60%	$\geq 70\%$	18-25	0.9-1.3
灌草型	2.5-4.0	$\leq 20\%$	$\geq 60\%$	8-12	0.4-0.7
草坪型	1.0-2.0	$\leq 5\%$	$\geq 50\%$	3-6	0.3-0.5

四类配置方案呈现“碳汇效能与成本正相关”的特征，为后续多目标优化模型的参数设定提供了核心依据。

设置三种优化情景：S1 (现状维持，基准对照)、S2 (碳汇优先，单一目标)、S3 (综合优化，多目标协同)。模型假设研究期内政策稳定，优化不涉及基本农田与生态红线，碳汇系数与成本采用实测及定额标准。

2.3 模型运行与结果解译

NSGA-II 参数设置：种群规模 200，最大进化代数 500，交叉概率 0.9，变异概率 0.1，第 412 代收敛，生成 47 个帕累托最优解。帕累托前沿显示，碳汇效能与建设成本呈显著负相关 ($r=-0.73$)，与景观连通性呈正相关 ($r=0.58$)。

(1) 不同情景对比与敏感性分析：三种情景的优化结果对比清晰，具体指标如下表所示，通过多维度对比可明确不同优化导向的实施效果：

评价指标	现状值	S1 现状维持	S2 碳汇优先	S3 综合优化
碳汇效能(万 tCO ₂ e/a)	27.45	27.8	32.8	30.2
较现状提升	—	+1.3%	+19.5%	+10.1%
整体连通性 IIC	0.052	0.053	0.058	0.087
建设成本(亿元)	—	1.2	8.9	6.7
乔木比例	38.2%	38.5%	52.6%	48.3%
乡土树种比例	65.3%	65.8%	78.2%	74.5%

敏感性分析表明，乔木覆盖率（敏感系数 0.63）、乡土树种比例（0.41）对碳汇影响最显著，土地整理成本（0.52）对建设成本影响最大，提升乔木覆盖率是最具成本效益的优化路径。

3 园林碳汇优化配置策略与实施路径

3.1 空间导向的园林碳汇优化配置方案

（1）碳汇核心区保护与提升区优化：识别碳汇核心区 1380ha（占 21.0%），包括岳麓山风景区、湘江风光带等，实施严格保护，维持群落稳定。碳汇提升区 2450ha（低效高潜力区），优化措施包括补植乔木（比例提升至 50%以上）、构建复层结构、推广乡土树种（≥70%）、替换低效树种。

（2）碳汇廊道构建与功能区差异化策略：构建碳汇廊道总长 76km（一级 3 条、二级 9 条），通过拓展宽度（一级≥50m、二级≥20m）、打通断点、强化节点，提升网络连通性。针对不同功能区制定差异化策略：居住区增加乔木与复层绿化（碳汇提升 25-35%），工业区选用抗逆树种（提升 20-30%），商业区推进垂直绿化（提升 15-25%），文教区建设生态校园（提升 30-40%），交通区贯通廊道（提升 20-30%）。

参考文献：

[1] 唐婧楠.基于碳汇与降温效能提升的哈尔滨城市绿地形态优化研究[D].东北林业大学,2025.

[2] 靖玉明.基于碳氧联合调控的深床人工湿地污染物净化效能提升机制与应用研究[D].山东大学,2024.

[3] 周正.基于分层固碳路径法的景观绿地碳汇效能研究[D].东南大学,2024.

[4] Giang L N,Aran H.Profitability Consideration of Corrugated Paperboard Production Based on Carbon Footprint Reduction and the Improvement of Overall Equipment Effectiveness[J].Frontiers in Artificial Intelligence and Applications,2018,301:188-200.

3.2 多目标协同的优化方案效益评估

综合优化后，碳汇效能提升至 30.21 万 tCO₂e/a，净增 2.76 万 tCO₂e/a（提升 10.1%），其中提升区贡献 75.4%、核心区 16.3%、廊道 8.3%。景观格局显著优化：IIC 指数提升 67.3%，PC 指数提升 43.6%，绿地破碎化降低。成本效益分析显示，总投资 6.7 亿元，30 年生命周期年均成本 0.45 亿元，单位碳汇成本 163 元/tCO₂e，结合碳交易市场价格，具备经济可行性。选取协同度最高（CI=0.82）的帕累托解作为推荐方案，实现多目标最优平衡。

3.3 面向低碳城市的智慧园林实施路径

设计智慧园林决策支持系统，涵盖数据管理、分析评估、优化决策、可视化四大模块。划定三类管理分区：核心保育区（严格保护）、优化提升区（重点改造）、监测调控区（动态管控）。实施时序分为三期：近期（1-2 年）改造低效区、连接一级廊道，投资 2.5 亿元，碳汇增量 1.2 万 tCO₂e/a；中期（3-5 年）推进居住区、工业区绿化，建设二级廊道，投资 3.2 亿元，累计增量 2.1 万 tCO₂e/a；远期（6-10 年）全域优化，投资 1.0 亿元，累计增量 2.8 万 tCO₂e/a。

构建保障机制：将碳汇效能纳入规划指标，建立多部门协同机制，鼓励公众参与，探索碳汇交易收益反哺机制，保障方案落地。

4 结论

本研究构建了基于碳汇效能提升的智慧园林多目标优化配置框架，主要结论如下：（1）建立了碳汇、连通性、成本三目标体系及多重约束的技术框架，提供了系统化方法论；（2）NSGA-II 模型情景模拟表明，综合优化情景实现了多目标平衡，碳汇提升 10.1%，连通性提升 67.3%，成本较碳汇优先情景降低 24.7%；（3）提出“核心区保护-提升区优化-廊道连通-功能区差异化”的空间策略，形成精细化管控体系；（4）设计了决策支持系统与分阶段实施路径，为成果转化提供保障。

本研究为低碳城市绿地规划、园林精细化管理提供了方法支撑与实践参考。未来可进一步探索碳汇与其他生态功能的协同，推动决策支持系统落地应用。