

基于全生命周期的城市绿地碳源/汇核算研究 ——以郑州龙湖外环为例

Research on Carbon Source / Sink Accounting of Urban Green Space Based on the Whole Life Cycle: A Case Study Within the External Circle of Zhengzhou Longhu

林奕成¹ 易 扬¹ 张 浪^{1*} 武艳芳² 张桂莲^{1*} 胡传伟² 徐自恒²
LIN Yicheng¹ YI Yang¹ ZHANG Lang¹ WU Yanfang² ZHANG Guilian¹ HU Chuanwei² XU Ziheng²

(1.上海市园林科学规划研究院, 城市困难立地生态园林国家林业和草原局重点实验室, 国家林业和草原局城市困难立地绿化造林国家创新联盟, 上海市城市困难立地园林绿化技术工程中心, 上海 200232; 2.棕榈生态城镇发展股份有限公司, 郑州 450003)

(1. Shanghai Academy of Landscape Architecture Science and Planning, Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Ecological Landscaping of Challenging Urban Sites, National Innovation Alliance of National Forestry and Grassland Administration on Afforestation and Landscaping of Challenging Urban Sties, Shanghai Engineering Research Center of Landscape on Challenging Urban Sties, Shanghai, China, 200232; 2. Palm Ecological Town Development Co., LTD., Zhengzhou, Henan, China, 450003)

文章编号: 1000-0283(2024)08-0140-07
DOI: 10. 12193 / j. laing. 2024. 08. 0140. 017
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2024-05-14
修回日期: 2024-07-01

摘 要

随着全球气候变化和城市化的加速, 城市绿地的碳源汇核算成为指导城市碳库合理建设和科学评估碳汇能力的重要工具。基于城市绿地全生命周期的碳源和碳汇量化方法, 结合相应核算模型, 以郑州龙湖外环为例, 对其绿地范围内50年全生命周期的碳源和碳汇进行比较研究和预测。结果表明, 研究区在建设初期存在碳源和碳汇不平衡的现象, 碳源和碳汇量在全生命周期的第20年时才可达到平衡的结果, 并在全生命周期的后30年呈现为正向的生态效益。其中, 材料和维护阶段的碳源是研究区碳源的主要来源, 而乔木和灌木在研究区中起到至关重要的碳汇作用。采用多种碳核算方法, 评估和预测城市绿地的碳源汇状况, 以期为城市绿地碳汇功能提升、城市“碳中和”目标的实现提供支撑。

关键词

碳源; 碳汇; 核算方法; 全生命周期; 城市绿地

Abstract

Research on carbon source and sink accounting of urban green spaces is beneficial for guiding the rational construction of urban carbon reservoirs and scientific assessment of carbon sinks. Based on methods and accounting models for quantifying carbon sources and sinks throughout the entire lifecycle of urban green spaces, this study compares the carbon sources. It sinks over a 50-year lifecycle within the Longhu Outer Ring of Zhengzhou. The results show an imbalance between carbon sources and sinks in the initial stages of construction, with a balance achieved nearly 20 years into the lifecycle, followed by positive ecological benefits in the subsequent 30 years. During the lifecycle, the material and maintenance stages are the primary sources of carbon sources, while trees and shrubs play a crucial role as carbon sinks in the study area. This study adopts various carbon accounting methods to evaluate and predict the carbon source and sink status of urban green spaces to provide support for improving the carbon sink function of urban green spaces and achieving the goal of “carbon neutrality” in cities.

Keywords

carbon source; carbon sink; accounting method; lifecycle; urban green space

林奕成

1995年生/男/浙江丽水人/硕士/研究方向为林业碳汇

张 浪

1964年生/男/博士/教授级高工(二级)/博士生导师/上海领军人才/享受国务院特殊津贴专家/城市困难立地园林绿化国家创新联盟理事长、上海城市困难立地绿化工程技术研究中心主任、城市困难立地生态园林国家林草局重点实验室主任/研究方向为生态园林规划设计与技术研究/本刊主编

张桂莲

1976年生/女/山西太原人/博士/高级工程师/研究方向为生态学

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: zl@shsyky.com; zgl@shsyky.com

基金项目:

国家重点研发计划课题“城市绿地湿地碳汇监测与核算方法”(编号: 2022YFC3802605); 上海市科委青年科技英才扬帆计划“基于高光谱和激光雷达的城市绿地植被群落碳汇计量监测技术研究”(编号: 22YF1444000); 上海市科委软科学研究青年项目“‘双碳’背景下上海城市绿地碳汇功能评估体系研究”(编号: 23692120300); 上海市科委自然科学基金面上项目“城市绿地三维结构对夏季热岛效应的影响机制研究”(编号: 23ZR1459700); 上海市绿化和市容管理局项目“上海公园绿地植物群落碳汇评估与增汇关键技术研究”(编号: G22021); 上海市科委社会发展科技攻关项目“超大城市上海公园城市构建关键技术与示范”(编号: 23DZ1204400)

气候变化是当今人类生存和社会经济发展面临的严峻挑战，是世界各国普遍关注的重大全球性问题。随着中国提出“碳达峰、碳中和”的目标，大规模国土绿化和提升生态系统碳汇能力成为重要举措。政策文件多次强调科学绿化，增强生态系统功能，提升碳汇能力^[1-2]。2021年10月，中共中央、国务院下发《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》（中发〔2021〕36号）提出：“建设城市生态和通风廊道，提升城市园林绿化水平”。由此可见，科学推进城市绿地绿化建设，提升城市生态系统碳汇能力，已经成为当前中国做好城市“双碳”工作所面临的当务之急^[3]。

城市绿地是生态空间体系的关键性要素，更是城市生态系统碳汇能力建设的重要依托^[4]。在国土绿化增量有限的情况下，发展以增汇、减排、稳库为导向的碳汇型城市绿地，提升单位面积碳汇能力，将成为新发展阶段各城市贯彻落实中央应对气候变化有关精神、积极有效提升生态系统碳汇水平和生态效益的重要举措。而在资源集约、人口密集、用地紧缺的城市化区域，规划和建设高质量的城市绿地，不仅可以发挥其多重社会效益和生态效益，更是提升城市生态系统碳汇能力的重要途径^[5]。但是，绿地也会产生自然碳源和人为碳源（建设、养护和管理）。国内外多项研究表明，绿地在建设过程中处于碳源的状态，建设期间的用材、能源消耗和施工工艺等方式，对绿地建设期间的碳排放有直接的影响作用^[6]。从绿地增汇角度，许多研究从空间布局、高碳汇绿化树种筛选与植物群落配置、土壤碳固持能力的提升等方面开展工作^[7-8]。城市绿地从规划设计、建设到管养全生命周期碳收支核算的研究还比较少见。因此，基于全生命周期的碳

源和碳汇核算不仅能够量化城市绿地对碳中和的贡献，还能够识别不同阶段的碳排放关键点，为城市绿地的规划设计和管养提供科学依据。相比其他研究大多集中在某一特定阶段的碳源汇量测算，本研究的创新之处在于综合考虑城市绿地的整个生命周期，从建设、养护到后续运维，全面评估其碳中和效益，通过长时间尺度的研究，揭示城市绿地整个生命周期内碳源和碳汇的动态变化，明确碳中和的时间节点，为城市“双碳”目标的实现提供精确的数据支持^[9]。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

郑州龙湖外环位于郑州市郑东新区，包含绿地面积约278 hm²，地处暖温带季风气候，四季分明，夏季炎热潮湿，冬季寒冷干燥。夏季平均气温在25 ~ 30℃之间，冬季平均气温在0 ~ 5℃左右。湿度较高，尤其在夏季，降水较多，气候湿润。作为郑州市重点生态区域，该区域内涵盖了不同类型的城市绿地，包括公园绿地、防护绿地和街头绿地等，能够代表城市绿地的多样性和复杂性。此外，郑州位于中国中部地区，其气候条件、土壤类型和城市发展模式具有一定的代表性，而龙湖外环区域是郑州市的繁华商业中心之一，拥有多个商业综合体、住宅区和办公楼，商业活动频繁、人口密集、交通便利，具有独特的地理位置和气候特征，且城市化程度较高。对该地区的碳源汇特征进行深入研究，有助于更好地了解城市绿地碳源汇情况，为环境保护和碳减排提供科学依据。

1.2 研究方法

1.2.1 城市绿地全生命周期碳源/汇研究

（1）城市绿地全生命周期碳核算，能够

较为直观地反映绿地的碳中和能力，全生命周期评估法是评估产品或生产活动对环境影响的方法，通过量化物质和能量流以及环境排放来识别环境负荷。评价包括确定范围、清单分析和影响评价。而在城市绿地碳核算中，绿地通过植物生长和蓄积均存在减碳的效应，因此呈现碳排放和碳吸收的双重过程^[10]。

（2）城市绿地全生命周期碳源核算，基于绿地项目的等级类型、立地条件、建设目标等，从项目建设施工到管养管理全过程，核算景观材料生产、建造、日常使用维护等阶段的碳排放，具体包括苗木运输、整地挖穴等工程建设措施和修剪、施肥、病虫害防治等管养管理模式涉及的碳排放。建立包含活动水平数据和碳排放系数的变量和参数数据库，构建碳源核算框架和方法体系，分析绿地建设和管养过程中碳排放的关键环节及其影响因素。

（3）城市绿地全生命周期碳汇核算，通过开展绿地调研、资料收集和现场监测等方法，确定绿地植物群落类型或物种，获取研究区气象数据、群落郁闭度、物种胸径、树高、生长率等参数，运用生物量生长模型，模拟计算绿地建设后5年、10年、20年、50年的植被固碳量，研究其动态变化，并分析管养管理措施对植物固碳作用的影响。

基于城市绿地碳源/汇核算框架，根据规划情景，分析城市绿地在未来50年全生命周期的碳收支平衡状况。同时，建立减碳、增汇多方案情景，开展城市绿地不同时间段碳源/汇核算和对比分析，提出建设管养优化模式，为构建高生态效益城市绿地提供科技支撑。

1.2.2 边界界定

参考《建筑碳排放计算标准》（GB/T51366-2019）及相关碳排放计算的文件规定^[11-13]，界定

城市园林绿地项目全生命周期的碳排放包括材料生产及运输、施工建造、维护管养和绿地碳汇4个部分。与建筑领域的碳排放生命周期不同,园林工程主要以绿化工程为主,其设计通常不会设定明确的使用年限。相比建筑工程,园林工程中的硬质景观建设量较少。建筑设计通常会考虑使用年限并在超出后可能进行整体拆除,因此建筑碳排放会将更新和拆除部分的碳排放作为主要组成部分。相反,园林工程的设计更注重绿化,且不受严格的使用年限限制,其更新和拆除的量主要产生于工程建设阶段对场地清理,包括建筑物、构筑物、枯死植物等,以及项目后期养护管理中对植物材料和相关设施的更换更新,因此未将更新拆除作为园林工程碳排放的主要内容。

1.2.3 碳汇计算模型

(1) 乔木碳汇计算模型见公式(1):
$$W_{\text{乔木碳汇}} = (ABIO_{\text{乔}} - BBIO_{\text{乔}}) \times C_{\text{乔}} \quad (1)$$

式中, $W_{\text{乔木碳汇}}$ 表示乔木的碳汇量(kg); $ABIO_{\text{乔}}$ 表示乔木一开始生长年份的生物量(g/m^2); $BBIO_{\text{乔}}$ 表示乔木最后生长年份的生物量(g/m^2); $C_{\text{乔}}$ 表示乔木的含碳率。

(2) 生物量模型见公式(2)(3):
$$BIO_{\text{乔}} = a \times D^b \quad (2)$$

公式(2)为仅以胸径为自变量的生物量估测方程,式中, $BIO_{\text{乔}}$ 为全树生物量(kg); D 为胸径(cm); a 、 b 为待求参数。

$$BIO_{\text{乔}} = a (D^2 H^b) \quad (3)$$

公式(3)为以胸径和树高为自变量的生物量估测方程,式中, $BIO_{\text{乔}}$ 为全树生物量(kg); D 为胸径(cm); H 为高(m); a 、 b 为待求参数。

本研究共收集硬阔乔木生物量方程33个,软阔乔木生物量方程47个,针叶乔木生物量方程12个;收集不同树种含碳率参数78个。

(3) 胸径生长预测模型。考虑样本数据以及各模型参数受到气候条件、林分密度和不同立地条件的影响,综合各方面因素,从常用树木生长经验方程中选取4个经验方程作为参考(表1),其中 t 为年份, y 为胸径, a 、 b 、 c 为常量, e 为无理数。本研究共收集华中、华南地区常见绿化乔木树种(组)胸径一年龄生长模型7种。

(4) 灌木及草本碳汇计算。灌木与草本地被的碳汇绩效计算见公式(4)(5):

$$W_{\text{灌木年均碳汇}} = M_{\text{灌木}} \times A_{\text{灌木}} \quad (4)$$
$$W_{\text{灌木总碳汇}} = N \times W_{\text{灌木年均碳汇}} \quad (5)$$

式中, $W_{\text{灌木年均碳汇}}$ 表示灌木或草本地被植物的年均碳汇量(kg); $M_{\text{灌木}}$ 表示不同种类灌木植被被年均单位面积碳汇速率($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$); $A_{\text{灌木}}$ 表示研究区内灌木或草本地被的总种植面积(m^2); N 表示研究区建成的总年数; $W_{\text{灌木总碳汇}}$ 表示灌木或草本地被自研究区建成后 N 年的总碳汇量(kg)。

2 全生命周期碳核算

在针对龙湖外环研究区的全生命周期碳源核算研究中,主要涵盖建材生产、能源消耗以及日常养护阶段的碳源。建材生产阶段包括原材料开采、加工、运输等环节产生的碳排放,能源消耗阶段涉及研究区运维过程中的能源使用情况,而日常养护阶段则包括绿化修剪、施肥、灌溉等活动。这些环节在研究区的整个生命周期中都会产生碳排放,对于全

面了解研究区的碳足迹和环境影响至关重要。通过深入研究和分析这些碳源,可以为减少碳排放、优化项目设计和管理提供重要参考,促进可持续发展和环保措施的实施^[14-15]。

2.1 建材生产阶段的碳源

建筑材料的碳排放主要来源于材料的提取,以及在工厂制造、加工和组装等生产过程中累积产生的碳排放^[16]。龙湖外环研究区建设过程中主要利用建筑材料进行硬质铺装和景观小品的建造,总共使用了9种不同的建筑材料。通过相关的统计数据和计算公式,最终核算出该研究区建筑材料的 CO_2 排放总量为2253t(表2)。

2.2 能源消耗阶段的碳源

研究区日常维护阶段的碳源,一部分来自研究区中各种设施使用过程中的电力消耗,主要来源于路灯、照明等消耗的能源;通过计算(表3),研究区灯具年均排放 CO_2 量从大到小为:庭院灯>投光灯>射树灯>草坪灯>LED灯带。

2.3 日常养护阶段的碳源

部分碳源来自研究区中绿地的养护与管理,包括植物的修剪(草坪、绿篱)、养护施肥、绿化灌溉和绿化垃圾外运等方面。这些活动在维护绿化产生碳汇的同时也会产生一定量的碳排放,对全生命周期碳源汇平衡产

表1 4种常用树木生长经验方程
Tab. 1 Four commonly used empirical equations for tree growth

模型 Model	表达式 Formula
舒马切尔	$y = ae^{-bt}$
单分子式	$y = a(1 - e^{-bt})$
对数	$y = a + blg(t)$
柯列尔	$y = at^be^{-ct}$

表2 研究区建材使用列表及CO₂总排放量
Tab. 2 List of building materials use and total CO₂ emissions in the study area

类目 Category	数量 Amount	CO ₂ 排放系数 /kgCO ₂ e CO ₂ emission coefficient	排放量 /kg Emissions
玻璃	2.96 m ³	1 130.00	3 341.18
钢筋	138.00 t	63 855.00	326 370.00
混凝土	4 478.17 m ³	5 015.00	132 1061.21
沥青混凝土	66.78 m ³	439.00	29 314.66
木材	2 222.90 m ³	313.82	26 830.38
铺砖	359.71 m ³	5 929.00	304 674.37
石材	721.23 m ³	797.80	28 769.78
水泥	289.19 m ³	4 410.00	212 556.12
碎石	254.30 m ³	26.16	554.38

表3 研究区灯具耗能及CO₂排放表
Tab. 3 Energy consumption and CO₂ emissions of lighting fixtures in the research area

类目 Category	数量 Amount	功率 /W Capacity	年耗电量 /(kW/h) Annual electricity consumption	年均 CO ₂ 排放量 /kg Annual average CO ₂ emissions
LED 灯带	112 m	5	2 460.9	1 920.00
草坪灯	25 套	11	12 478.62	9 735.82
射树灯	304 套	18	23 967.36	18 699.33
庭院灯	492 套	28	60 338.88	47 076.39
投光灯	32 套	250	35 040.00	27 338.21
总计				104 769.75

注：按照华北电网给出的1 kW/h电力的CO₂排放系数为0.7802 kg（日均开灯12 h计算）。

表4 研究区养护能源消耗及CO₂排放表
Tab. 4 Energy consumption and CO₂ emissions for maintenance in the study area

类目 Category	每 m ² 绿化用地年均消耗 /kg Annual average consumption of green land per square meter	总消耗量 Total consumption	排放因子 Emission factors	总排放量 /kg Total emissions
绿化修剪 (草坪、绿篱)	0.0072	3 500 L	2.20 kgCO ₂ /L	11 220
二胺复合肥	2.06E-05	10 t	260.28 kgCO ₂ /t	2 602.8
各种杀虫剂	0.0005	260 kg	7.73 tCO ₂ /t	2 009
灌溉	0.2042	99 056 t	0.3 kgCO ₂ /t	29 715
绿化垃圾外运	0.0025	1 200 L	2.73 kgCO ₂ /L	2 376

生影响。通过计算，研究区养护活动年均排放CO₂量从大到小为：灌溉>绿化修剪>施肥>绿化垃圾外运>杀虫。

2.4 研究区全生命周期碳汇量化

在针对龙湖外环研究区的全生命周期碳

汇核算研究中，主要通过碳汇计算模型核算相应植物的碳储量及碳汇量，其中包括乔木碳汇计算模型、生物量模型以及胸径生长预测模型^[17]。乔木碳汇计算模型通过综合考量乔木生物量的变化和含碳率，定量评估乔木的碳汇量；生物量模型则通过胸径和树高等

因素，估算树木的生物量，为后续碳汇计算提供基础数据^[18]；胸径生长预测模型则用于预测乔木生长情况，为研究区碳汇预测计算提供更准确的数据支持。本文参考的模型主要来自于文献收集和地方标准。通过综合分析和应用这些模型，能够更全面地了解碳汇在研究区全生命周期中的变化和影响，深入研究碳汇的动态变化^[19]。

乔木的碳汇是研究区绿化中碳汇的主要来源，通过统计及调研龙湖外环研究区的绿化工程量，共计包含乔木35种。在计算这一部分碳汇时，通过异速生长方程对各树种生物量、碳储量进行估算，并基于各树种组胸径一年龄生长模型预测各树种生长量，从而得出研究区全生命周期内各树种的碳汇量（表5）。

灌木与草本地被的碳汇计算，借鉴绿地植物群落固碳效益分析及高固碳植物群落的优化计算方法^[20]，在计算这一部分碳汇时，根据碳汇速率计算灌木、草本、竹林的CO₂年吸收量，对研究区的灌木、草本地被以及竹类碳汇量进行概算。

核算结果表明，碳汇主要来源于栽植乔木、栽植灌木和草地及栽植竹类等。栽植乔木13 430株，35种，年均碳汇量约39 t，50年全生命周期碳汇量约3 423 t；乔木全生命周期碳汇量由高至低排序依次为大叶女贞、毛白杨、悬铃木、银杏、栾树、英桐、国槐、白蜡、白皮松和巨紫荆；栽植灌木15 383 m²，年均碳汇量约167 t，50年全生命周期碳汇量约8 384 t；铺种草皮70 231 m²，年均碳汇量约28 t，50年全生命周期碳汇量约1 404 t；栽植竹类15 383 m²，年均碳汇量约22 t，50年全生命周期碳汇量约1 094 t。

2.5 碳源汇核算结果

对龙湖外环研究区各个阶段的碳源/汇

表5 研究区全生命周期内各树种的碳汇量
Tab. 5 Carbon sink of various tree species throughout the entire life cycle of the study area

类目 Category	株数 / 株 Number	平均胸径 /cm Average DBH	单株平均含碳量 /kg Average carbon content per plant	全生命周期总碳 汇量 /kg Total carbon sink
白蜡 <i>Fraxinus chinensis</i>	639	15.83	40.97	131 916.10
白皮松 <i>Pinus bungeana</i>	305	12.00	14.75	96 172.15
白玉兰 <i>Yulania denudata</i>	103	10.00	11.64	11 856.52
垂柳 <i>Salix babylonica</i>	29	12.00	14.75	9 144.24
大叶女贞 <i>Ligustrum japonicum</i>	1 972	14.57	32.19	516 559.94
二乔玉兰 <i>Yulania × soulangeana</i>	5	18.00	40.02	703.25
枫杨 <i>Pterocarya stenoptera</i>	10	20.00	62.28	4 013.03
复叶槭 <i>Acer negundo</i>	65	12.00	13.73	19 088.47
广玉兰 <i>Magnolia grandiflora</i>	26	16.33	29.87	3 206.06
国槐 <i>Styphnolobium japonicum</i>	906	17.57	49.36	190 639.19
旱柳 <i>Salix matsudana</i>	105	14.00	22.78	35 589.78
红花刺槐 <i>Robinia pseudoacacia f. decaisneana</i>	175	12.00	21.68	34 786.16
红叶石楠树 <i>Photinia × fraseri</i>	53	12.00	21.68	10 535.24
红叶杨 <i>Populus deltoids</i>	141	10.00	12.66	35 149.54
黄连木 <i>Pistacia chinensis</i>	75	15.75	42.74	16 144.58
火炬树 <i>Rhus typhina</i>	31	12.00	21.68	6 162.12
金叶复叶槭 <i>Acer negundo ‘Aurea’</i>	119	15.00	25.77	38 829.84
金枝槐 <i>Styphnolobium japonicum</i>	151	12.00	21.68	30 015.49
金枝柳 <i>Chosenia Nakai</i>	62	12.00	20.69	38 011.81
巨紫荆 <i>Cercis gigantea</i>	396	15.00	34.67	82 871.32
栾树 <i>Koelreuteria paniculata</i>	885	15.50	44.52	305 292.63
毛白杨 <i>Populus tomentosa</i>	1 827	9.00	10.02	453 112.70
朴树 <i>Celtis sinensis</i>	97	19.67	64.98	21 029.82
千头椿 <i>Ailanthus altissima</i>	77	13.50	28.53	15 870.29
楸树 <i>Catalpa bungei</i>	248	15.50	38.64	50 501.19
三角枫 <i>Acer buergerianum</i>	271	13.75	29.70	53 162.43
朴树 <i>Celtis sinensis</i>	5	30.00	149.11	1 071.21
柿树 <i>Diospyros kaki</i>	4	30.00	195.43	1 797.43
乌桕 <i>Triadica sebifera</i>	16	19.00	57.21	3 489.97
五角枫 <i>Acer pictum</i>	168	20.00	63.52	37 050.05
悬铃木 <i>Platanus</i>	1 904	17.86	50.18	406 832.62
银杏 <i>Ginkgo biloba</i>	1 523	20.00	73.66	406 256.22
英桐 <i>Platanus × acerifolia</i>	824	17.50	44.98	289 407.04
榆树 <i>Ulmus pumila</i>	207	16.00	38.51	65 786.84
日本早樱 <i>Cerasus yedoensis</i>	6	10.00	14.77	1 142.33
总计				3 423 197.61

进行了计算(表6),基于植物的生长年标准,将研究区全生命周期设置为50年。龙湖外环研究区中的碳汇主要来源于绿化,全生命周期总碳汇量为4 418 tCO₂。全生命周期内景观材料的碳源为2 253 t,照明能源消耗的碳源为5 238 t,绿化养护管理阶段的碳源为2 396 t。

在研究龙湖外环研究区的全生命周期碳源汇相关内容时,发现碳源和碳汇的平衡问题是一个关键挑战。与传统观念不同,项目建设并非一项单纯的正向活动,而是在其整个生命周期中产生大量CO₂排放。以龙湖外环研究区为例,研究表明在建设初期存在碳源和碳汇不平衡的情况,初期碳源远大于研究区内可产生的碳汇。将不同使用年限下的研究区内的碳源和碳汇进行比较(图1,表7)。通过上述比较可以看出,龙湖外环研究区的碳源和碳汇在使用前19年中,材料建设及运行阶段产生的碳源量都大于植物的碳汇量,当到了第20年使用年限时,植物的碳汇量已经开始超过与研究区的总碳排放量,研究区的生态效益开始呈现为正向的生态效益。

3 讨论和结论

3.1 讨论

研究和数据表明,研究区碳汇的增加量主要来自区域内所种植绿化的固碳。在乔木固碳方面,乔木的固碳量与树种的胸径、冠幅及种类有密切关系,不同的植被类型及不同种的乔木,也有不同的核算模型和碳汇因子,选取碳汇能力较强的乔木,能够显著提升绿地的综合碳汇效益与碳汇价值,因此建议在同样条件下,应选择固碳量强的植物为骨干树种。

同时,在栽植乔木的阶段,选择栽植不同径阶的乔木也会影响全生命周期内以及后

表6 研究区全生命周期碳源汇核算结果 (单位: t)
Tab. 6 Accounting results of carbon sources and sinks throughout the entire life cycle of the research area

类别	Category	年均碳汇 / 源	Annual carbon sink/source	全生命周期总碳汇 / 源	Total carbon sink/source throughout the entire lifecycle
碳汇	栽植乔木	39		3 423	
	栽植灌木	167		8 384	
	铺种草皮	28		1 404	
	栽植竹类	22		1 094	
碳源	工程材料生产 / 建造	—		-2 253	
	照明使用 / 消耗	-104		-5 238	
	绿化养护管理	-48		-2 396	
总计	—	104 (表现为碳汇)		4 418 (表现为碳汇)	

表7 研究区全生命周期碳源碳汇比较 (单位: t)
Tab. 7 Comparison of carbon sources and sinks throughout the entire life cycle of the study area

类别	Category	周期						
		1 年后	10 年后	19 年后	20 年后	30 年后	40 年后	50 年后
植物固碳量		253.66	2 605.00	5 067.05	5 346.50	8 192.95	11 107.62	14 051.86
碳排放量		2 405.00	3 773.00	5 141.00	5 293.00	6 813.00	8 333.00	9 853.00
差值		-2 151.34	-1 168.00	-73.95	53.50	1 379.95	2 774.62	4 198.86

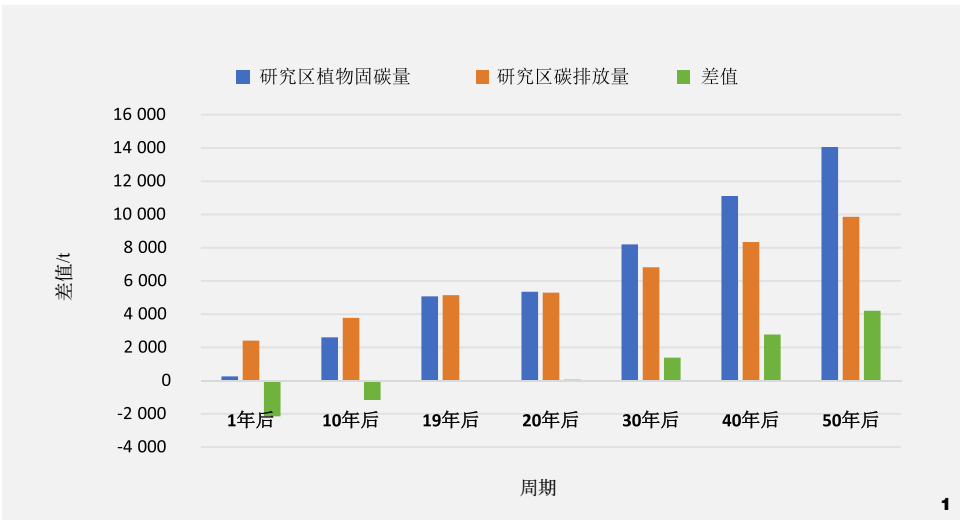


图1 不同使用年限下的研究区内的碳源和碳汇比较
Fig. 1 Comparison of carbon sources and sinks in the study area under different usage years

续的碳汇量,如选择栽植较小径阶的乔木批次,项目或研究区整体初始碳储量及碳汇量则会偏小,但随时间推移碳汇量增长速度较

快,全生命周期碳汇总量较大;如选择栽植较大径阶的乔木批次,则研究区整体初始碳储量及碳汇量较大,项目或研究区能更早实

现全生命周期碳中和,但随着一些乔木生长到一定径阶后,生长速率放缓,碳汇量增长变慢,全生命周期碳汇总量并不一定高于栽植径阶小的乔木。这是在项目或研究区全生命周期增汇策略中需要思考的一方面。

另外,在龙湖外环研究区,替换原有草坪种植多年生草本植物或灌木是一种增加固碳量的方法。草坪的固碳量较低且需要频繁修剪,固碳效果可以忽略不计。而地被植物和多年生草本植物无需修剪,且其固碳量高于草坪。

在全生命周期的各个阶段中,材料生产/建造阶段的碳排放占据重要比重。选择材料时,了解其碳排放因子,优先选择生产工艺高效、碳排放低的材料和建设方式至关重要。在运维过程中,降低能源消耗是关键。改用LED光源5 W的照明设施替代大功率照明设施,采用低碳环保的养护管理方式,减少化肥使用量,并回收落叶等生物废弃物转化为土壤改良剂和绿化有机肥,减少肥料使用量和生物垃圾外运量,都是实现低碳目标的关键步骤。

3.2 结论

在本研究中,以郑州龙湖外环为例,通过对绿地中全生命周期的碳源和碳汇进行比较研究,得到研究区整体在建设初期存在碳源和碳汇不平衡的结果,建设材料和运维养护阶段的碳源是研究区碳源的主要来源,其中碳排放最大的部分来自于照明使用/消耗,为5 238 tCO₂。而研究区中绿地的乔、灌、草则在全生命周期中持续产生碳汇量,其中乔木大叶女贞的全生命周期碳汇量最大为517 tCO₂,逐年中和研究区中的碳排放。在城市绿地规划的设计阶段,就必须考虑全生命周期碳源汇计量的概念,结合对空间规划、绿化植

被、设施建筑、施工过程和运维管养等因素的综合考虑，全面打造绿地，以突显其生态效益。特别是在城市建成区用地紧张的情况下，通过科学的方法计量并依此改善建设/管养策略，以提高单位面积绿地的碳汇能力、或降低单位建设用地的碳排放，都有助于支持低碳城市建设，减缓温室效应的影响。

注：文中图表均由作者绘制。

参考文献

[1] 华秋红.“双碳”背景下我国环境会计信息披露研究现状与发展趋势——基于CiteSpace的可视化分析[J]. 中国注册会计师, 2022(04): 47-53.

[2] 胡长清. 为实现“双碳”目标贡献林业力量[J]. 林业与生态, 2022(09): 6-7.

[3] 张桂莲, 仲启铖, 张浪. 面向碳中和的城市园林绿化碳汇能力建设研究[J]. 风景园林, 2022, 29(05): 12-16.

[4] 张桂莲, 邢璐琪, 张浪, 等. 城市绿地碳汇计量监测方法研究进展[J]. 园林, 2022, 39(01): 4-9.

[5] 童家靖, 黄伟, 黎秀琼, 等. 我国园林绿地的碳汇研究进展[J]. 热带生物学报, 2018, 9(01): 117-122.

[6] 王庆日. 城市绿地的价值及其评估研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.

[7] 赵敏. 上海碳源碳汇结构变化及其驱动机制研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2010.

[8] 罗薇羽. 基于低碳生态理念的武汉市主城区居住区绿地评价研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.

[9] 熊健, 卢柯, 姜紫莹, 等. “碳达峰、碳中和”目标下国土空间规划编制研究与思考[J]. 城市规划学刊, 2021(04): 74-80.

[10] 何晶. 基于全生命周期的城市绿地乔木群落碳收支研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.

[11] 曲辰, 牛萌, 孔柏涵. 园林工程项目碳排放测算研究与进展[J]. 市政技术, 2023, 41(12): 179-187.

[12] 孙建伟, 蒋世龙, 马义奎, 等. 建筑碳排放软件对比分析及计算研究[J]. 建筑施工, 2024, 46(01): 48-51.

[13] 何华. 华南居住区绿地碳汇作用研究及其在全生命周期碳收支评价中的应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.

[14] 冀媛媛, 罗杰威, 王婷, 等. 基于低碳理念的景观全生命周期碳源和碳汇量化探究——以天津仕林苑居住区为例[J]. 中国园林, 2020, 36(08): 68-72.

[15] 孙金龙. 为全球气候治理贡献中国智慧中国方案中国力量[J]. 当代世界, 2022(06): 4-9.

[16] 张营营, 赵紫昂, 徐俊豪, 等. 建筑膜结构全生命周期碳排放核算及减排策略研究[J/OL]. 钢结构(中

英文), 1-11[2024-07-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1609.tf.20240419.1537.002.html>

[17] 张坛烁. 低碳理念下城市口袋公园景观设计研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2024.

[18] 张杰铭, 赵广举, 金秋, 等. 水土保持植物措施碳汇研究综述[J]. 中国水土保持, 2024(02): 6-12.

[19] 李佳怡, 阮红玉, 邱思玉, 等. 基于经验模型和机理模型的杉木人工林生物量估测对比研究[J]. 生态学报, 2024, 44(08): 3502-3514.

[20] 黄卓, 荆贝贝. 大城市楔形绿地碳汇能力评估及提升策略研究——以上海张家浜楔形绿地为例[J]. 环境生态学, 2024, 6(03): 44-52.

2025年《园林》 刊专题征稿

为紧贴时代脉搏, 突显时代主题, 集中展示中国风景园林标志事件和新时代重大规划, 同时本着开放办刊、专题提前策划的工作方针, 2025年《园林》 刊拟选推出如下专题 (所列专题顺序, 不作为最终发刊专题顺序):

- (1) 都市圈蓝绿空间与保护地; (2) 可持续城市与社区景观; (3) 景观地方性与场所依恋; (4) 公园城市高质量发展; (5) 绿色基础设施与廊道规划; (6) 生态智慧景观; (7) 森林城市高碳汇与减排协同路径; (8) 铁路遗产景观; (9) 风景园林绿色低碳路径;
- (10) 城市气候与环境响应; (11) 数智化风景园林教育教学; (12) 老年友好绿地; (13) 绿地生态系统调节服务与使用者健康; (14) 城市生物多样性; (15) 景观感知赋能规划设计; (16) 健康城市与景观疗愈。

专题文章采用学术主持人组稿与作者自由来稿相结合的方式。稿件具体要求可关注“园林杂志”公众号。

