

城市公园碳平衡评估框架构建及影响因素研究 ——以南京为例

Research on the Construction of Carbon Balance Assessment Framework and Influencing Factors of Urban Parks: Taking Nanjing as an Example

袁昶洋^{1,2*} 杨明珠¹ 罗尚岑¹
YUAN Yangyang^{1,2*} YANG Mingzhu¹ LUO Shangcen¹

(1.东南大学建筑学院, 南京 210096; 2.江苏省城乡与景观数字技术工程中心, 南京 210096)
(1. School of Architecture, Southeast University, Nanjing, Jiangsu, China, 210096; 2. Jiangsu Provincial Urban and Rural Digital Technology Engineering Center, Nanjing, Jiangsu, China, 210096)

文章编号: 1000-0283(2025)02-0004-11
DOI: 10.12193/j.laing.2025.02.0004.001
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2024-10-24
修回日期: 2024-12-23

摘要

“双碳”背景下, 公园在城市减碳增汇方面展现出重要作用, 在城市碳循环中被赋予了碳平衡职能。但城市公园在提供休闲游憩服务的同时, 也伴随着大量的碳排放。为揭示城市公园是否为有效的碳汇体, 通过构建城市公园碳平衡评估框架, 评估南京 15 个城市公园的年度碳平衡情况, 明确影响城市公园碳平衡的关键景观要素指标。结果显示, 不同城市公园的年度碳平衡情况存在差异性, 绝大多数公园是“碳源”; 公园的面积越大, 植被覆盖度越高, 其碳吸收能力也越强, 照明、绿色废弃物处理和建筑运维是主要来源; 绿地率、硬质面积和建筑面积三个指标与碳平衡的实现密切相关。对城市碳平衡目标的达成具有积极的意义, 不仅可为城市公园的更新与改造提供数据支持, 也能够为运维管理的优化提供参考。

关键词

风景园林; 城市公园; 碳汇; 碳排放; 评估框架

Abstract

In the context of “dual carbon”, parks have shown an essential role in reducing carbon emissions and increasing sinks in cities and have been assigned the function of carbon balancing in the urban carbon cycle. However, while providing leisure and recreational services, urban parks are also accompanied by many carbon emissions. This study aims to reveal whether urban parks are adequate carbon sinks. By constructing a framework for evaluating the carbon balance of urban parks, we assessed the annual carbon balance of 15 urban parks in Nanjing. We used a machine learning method to clarify the key landscape element indicators that affect the carbon balance of urban parks. The results show that there are differences in the annual carbon balance of different urban parks, and most of the parks are “carbon sources”; the larger the area of the park, the higher the vegetation coverage, the stronger the carbon absorption capacity, and lighting, green waste treatment and building operation and maintenance are the primary sources; the three indicators of green space rate, hard surface area, and building area are closely related to the realization of the carbon balance. The three indicators of green space rate, complicated area, and building area are closely related to realizing carbon balance. This study is of positive significance to the achievement of carbon balance in the city, which provides data support for the renewal and renovation of urban parks and provides a reference for the optimization of operation and maintenance management.

Keywords

landscape architecture; urban parks; carbon sink; carbon emission; evaluation framework

袁昶洋

1987年生/女/江苏南京人/博士/副教授/
研究方向为风景园林规划设计及理论、数字
景观技术、城市蓝绿空间

杨明珠

2000年生/女/江苏盐城人/在读硕士研究生/
研究方向为园林规划与设计

罗尚岑

1999年生/男/四川成都人/在读硕士研究生/
研究方向为园林规划与设计

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

基金项目:

国家自然科学基金重点项目“低影响开发下的城市绿地规划理论与方法”(编号: 51838003); 东南大学“至善青年学者”支持计划资助项目
“城市建成区蓝绿空间布局对碳汇效益的影响机制研究”(编号: 2242023R40002)

人类活动产生的碳释放是全球变暖的主要原因之一，加强碳平衡管理、推动减排和碳固定技术发展，对于应对全球气候变化具有重要意义。公园作为具有高绿地覆盖度的大型绿色斑块，在城市减碳增汇方面展现出重要的作用，也承担了社会福祉的多重职能。过往的研究中，人们重视城市公园的碳汇能力，并希望其在城市碳循环中发挥碳平衡效能^[1-3]。但不可忽视的是，城市公园在提供休闲游憩服务的同时，也伴随着大量的碳排放。由此，引发了一个问题：城市公园是否真正扮演了碳汇的角色？为了最大化发挥城市绿地的碳汇潜力，首先应明确当下城市公园是否为一个有效的碳汇体。因此，对城市公园的碳平衡研究有助于揭示其在城市碳循环中的实际作用，对于达成城市碳平衡目标具有积极的意义。

碳平衡的研究始于20世纪初，最早关注大尺度下生态系统的碳平衡情况。近年来，在碳中和背景下，学者们逐渐关注城市尺度的碳平衡研究^[4-5]，如林奕成等^[6]研究比较了郑州龙湖外环绿地50年全生命周期内的碳源和碳汇。此外，还有学者聚焦公园的碳平衡研究^[7-8]。从上述研究可以发现，已有的研究侧重于全生命周期的城市公园碳平衡，时间跨度多为30~50年。然而，城市公园的建设是一个长期的过程，从全生命周期出发的评估在一定程度上缺乏精确性，也与实际情况存在一定距离。由此，对城市公园年度碳平衡的评估更具现实意义，不仅能够更准确地反映城市公园的碳收支状况及碳汇能力，而且有助于指导公园更新建设与后期运维管养。此外，上述研究中虽然关注的对象为城市公园，但实际仅局限于探讨公园内部的绿地，聚焦绿地的碳吸收以及维护过程中所产生的碳排放。城市公园作为一个功能复合的生态

空间，其构成要素多样，不仅包括绿地等软质景观，还涵盖硬质景观和建筑等构筑物，这些要素对城市公园碳平衡的影响同样不容忽视。

当系统排放的碳量与吸收的碳量相互抵消并达到动态稳定的时候，可以称该系统达到了“碳平衡”。目前被广泛使用的“碳平衡”计算方法主要有两种。一种是差值法，即采用碳吸收量减去碳排放量计算净固碳量。例如王超等^[9]在研究京津冀地区土地利用动态下的碳平衡时采用该方法计算了净碳排指标。另一种是比值法，学者采用碳排放量与碳吸收量之比作为衡量碳平衡的指标^[10-11]。上述两类计算方法各有特点，第一种差值法能够直观地定量体现碳收支情况，第二种比值法能够反映碳排与固碳的效益比。通过计算碳吸收量与碳排放量的比值，得出一个无量纲的数值，这有效地消除了不同量纲数据之间的比较障碍，使得结果更加直观且便于比较。为更好地评估和比较不同公园在城市碳循环中的作用，本研究选取比值法衡量各个城市公园的碳平衡情况，即为碳平衡系数。

在碳平衡的研究中，无论是差值法还是比值法，均涉及碳吸收量和碳排放量的计算。现有碳汇计算方法主要包括样地测量法、同化法和微气象法等^[12]。样地测量法大多采用异速生长方程来估算，但存在效率低下、成本高昂且耗时的问题^[13]。微气象法既适用于自然环境的碳循环研究，也可用于高密度的城市环境。其中，涡旋相关方差 (Eddy Covariance, EC) 方法为常用微气象方法，有学者采用该方法测量地中海城区上空二氧化碳通量^[14]。尽管有多个研究证实微气象方法的有效性，但是由于需要使用通量塔来直接测量二氧化碳通量，限制了在城市区域的广泛应用。同化法是一种基于生物学原理计算绿

地固碳能力的方法，已被学者广泛用于城市尺度的固碳研究^[15-16]。在碳排放量的计算方法方面，排放因子法是一个使用较为普遍的方法，例如，Zhang等^[7]在研究中国天津4个公园的碳排放量时，用排放因子法计算了建设和维护的碳排放量。McPherson和Kendall^[17]以芝加哥百万棵树项目为例，采用排放因子法计算了该项目在不同维护方式下的碳排放量。上述案例表明排放因子法能够有效地评估因建设和维护活动所产生的碳排放量，具有一定的适用性和实用性。

本研通过构建一个年度碳平衡评估框架，探讨城市公园的碳汇效益，基于南京15个城市公园开展实证研究，量化评估研究案例的碳平衡现状，进一步采用机器学习的方法探寻影响城市公园碳平衡的关键景观要素指标，并提出以正向碳平衡为目标的城市公园更新与管护优化途径，以期为城市公园的碳管理提供量化依据，进而为“双碳”背景下的城市公园更新与可持续发展提供科学支持。

1 城市公园年度碳平衡评估框架构建

本研究构建的城市公园年度碳平衡评估框架主要包括三个部分：碳吸收量评估、碳排放量评估，以及基于上述两项的碳平衡系数计算 (图1)。碳吸收量评估部分主要计算城市公园乔木与灌木的年度碳吸收量。乔木与灌木的碳吸收机制相似，以乔木为例，需获取一年中有效光合作用的天数及每日的碳吸收量。每日的碳吸收量基于同化量法^[1]计算，即通过日平均叶片的碳吸收率与叶片总面积的乘积获取。在碳排放量的评估中，根据碳排放的来源将城市公园年度碳排放分为自然系统排放和人为系统排放两类^[18]。自然系统碳排放指自然界的更新和演替过程中释

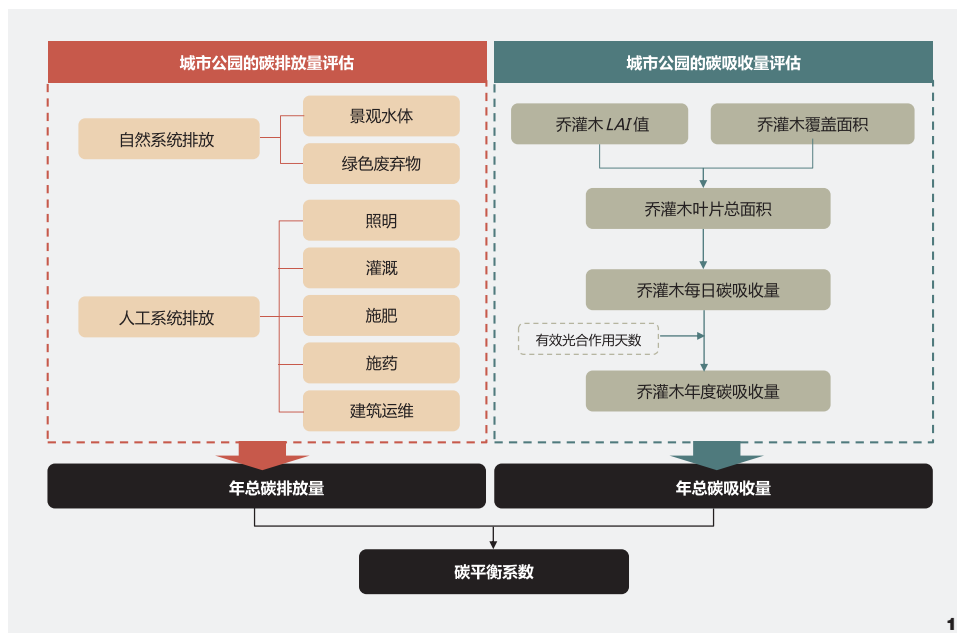


图1 碳平衡评估框架
Fig. 1 Carbon balance assessment framework

放的碳，如景观水体中的碳排放、绿色废物中有机物的分解与处理等；人为系统碳排放指人类活动直接或间接产生的碳排放，如灌溉、施肥、施药、照明、建筑运维等。框架的最后部分为碳平衡系数计算，通过年度碳吸收量与碳排放量之比得出。

1.1 碳吸收计算

由于草地和土壤在以年为周期的评估中对碳固存的贡献相对较小，由此乔木和灌木的碳吸收量为评估的重点。城市公园的年度碳吸收计算过程分为三个步骤。

(1) 叶面积总量计算。首先通过ArcGIS软件处理城市公园高分辨率卫星影像，计算归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 后，通过建立NDVI与叶面积指数 (Leaf Area Index, LAI) 之间的经验关系，反演公园总体LAI值。为确保计算准确性，对公园内植物LAI值开展实测。其次，使用ENVI

软件中图像分类工具，采用支持向量机法将公园的土地利用类型划分为乔木、灌木、草地、水面、建筑和硬质铺装6类，并分别计算各类的面积。最后，通过将各类植被LAI值与对应的植被覆盖面积S相乘，得到不同植被类型的总叶片表面积 (Leaf Area, LA)，计算见公式(1)。

$$LA = LAI_i \times S_i \quad (1)$$

式中，LA为植被总叶片表面积 (m²)，S为植被的覆盖面积 (m²)，i为不同的植被种类。

(2) 植被日碳汇量计算。计算城市公园乔木和灌木的LA值和平均单位叶面积固碳速率，将两者相乘获得植被日碳吸收量^[1]，见公式(2)。

$$C_d = LA \times P_n \quad (2)$$

式中，C_d为植被的日碳吸收量 (kg)，P_n为第n种植物的平均单位叶面积固碳速率 (g/m²)。

为获得乔木及灌木平均单位叶面积固碳速率，对常见乔灌木树种进行筛选，将频度大于10%的定义为常见树种^[19-20]。将常见树种的单位叶面积固碳速率数值相加后取平均值，计算结果作为乔木及灌木单位叶面积固碳速率。

(3) 植被年碳吸收量计算。植被在不同季节、不同气候条件下的碳吸收能力不同。在冬季，落叶植物暂时失去碳汇能力。当降雨量超过5 mm时，植物气孔倾向于关闭，进而暂停光合作用，碳汇能力较低。因此，在估算一年中植被的总碳汇量时，以有效光合作用天数计算，必须排除冬季落叶期以及降雨量超过5 mm的时间段^[21]。植被的年碳吸收量为乔木和灌木的年固碳量的总和^[1]，计算见公式(3)。

$$CS = (C_{d,t} + C_{d,s}) \times t \quad (3)$$

式中，CS为公园的年碳吸收量 (kg)，C_{d,t}为乔木每日碳吸收量 (kg)，C_{d,s}为灌木每日碳吸收量 (kg)，t为植物年有效光合天数 (d)。

1.2 碳排放计算

城市公园的碳排放可分为两大系统和7个项目。两大系统分别是自然系统和人为系统；7个碳排放项目是景观水体、绿色废弃物、灌溉、施肥、施药、照明、建筑运维。公园的碳排放量以CO₂当量 (CO₂ eq) 表示，采用排放因子法计算 (表1)。碳排放总量 (CE) 为自然和人为系统下7个项目的碳排放量总和，计算见公式(4)。

$$CE = \sum_{i=1}^n (C_{E,i} + C_{R,i}) \quad (4)$$

式中，C_{R,i}和C_{E,i}分别表示i类自然系统和人为系统的碳排放量。

1.3 碳平衡评估

碳平衡系数 (CBC) 由碳排放量 (CE) 与

表1 城市公园各项目碳排放计算
Tab. 1 Carbon emission calculation formula

碳排放项目 Carbon emission project	碳排放系数 Carbon emission coefficient	计算内容 Calculation content	计算公式 Calculation formula
景观水体	0.60 kgCO ₂ /m ^{2[22]}	水体面积	$C_{R,i} = k_i \times b_j$
绿色废弃物		绿色废物量	$C_{E,i} = \sum_j^n v \times b_j \times 3.66$
灌溉	0.17 kgCO ₂ /L ^[23]	消耗水量	$C_{E,i} = 0.001 \times q \times b_j \times k_i \times t_1$
施肥	0.07 kgCO ₂ /kg ^[24] ; 1.77 kgCO ₂ /kg ^[24]	化肥用量	$C_{E,i} = a_{b,j} \times b_j \times k_i \times n_{b,j} + a_{t,j} \times b_j \times k_i \times n_{t,j}$
施药	7.73 tCO ₂ /t ^[25]	农药用量	$C_{E,i} = b_j \times h \times k_i \times m$
照明	0.79 kgCO ₂ KW/h ^[26]	耗电量	$N = Q \times b_j / O \times U \times K$ $C_{E,i} = t_2 \times W \times N \times k_i$
建筑运维	33 kgCO ₂ /m ^{2[27]}	建筑占地面积	$C_{E,i} = n \times b_j$

注： $C_{R,i}$ 和 $C_{E,i}$ 分别表示*i*类自然系统和人为系统的碳排放量； k_i 表示*i*类项目的碳排放系数； b_j 表示*j*类用地类型的面积（m²）； v 表示每年公园产生的绿色废弃物量（kg）； q 表示浇水定额，取2 L/m²·d； t_1 表示灌溉的天数（d）； $a_{b,j}$ 表示*j*类用地类型基肥施肥量（kg/m²）； $a_{t,j}$ 表示*j*类用地类型追肥施肥量（kg/m²）； $n_{b,j}$ 表示*j*类用地类型基肥次数（次）； $n_{t,j}$ 表示*j*类用地类型追肥次数； h 表示农药使用量（kg/m²）； m 表示施药次数（次）； N 表示灯具数量（个）； Q 表示照度（lx）； O 表示光源光通量（lm）； U 表示利用系数，取0.4； K 表示维护系数，取0.7； t_2 表示公园的照明时间（h）； W 表示每盏灯泡平均功率（w）； n 表示公园建筑占地面积（m²）。

碳吸收量（CS）之间的比值获得，计算见公式（5）。

$$CBC = \frac{CE}{CS} \quad (5)$$

在本文的研究中，若CBC>1，该公园为净碳源，即碳排放大于碳固存，为负向碳平衡；CBC=1，则表明年度固碳与碳排放相等，达到了碳平衡；如果CBC<1，该公园为净碳汇，即碳固存大于碳排放，是正向碳平衡。

2 案例概况及数据处理

2.1 研究案例概况

南京市位于中国东部，地处长江下游平原，拥有丰富的水资源和多样的地貌特征。南京属于亚热带湿润气候，四季分明，雨量充沛，这为城市公园的植被生长和碳循环过程提供了适宜的环境条件。此外，南京作为中国东部沿海的经济发达城市，具有典型的高密度城市特征，近10年南京经济总体保持中高速增长，经济体量持续扩大，经济首位

度显著提升。南京的公园建设与城市发展紧密相关，拥有较好的公园建设水平。据南京市人民政府统计数据，截至2022年底全市建成区绿化覆盖率达44.96%，共有202个公园，人均公园绿地面积16.20 m²。

根据《城市绿地分类标准》（CJJT85-2017），城市公园类型包括综合公园、社区公园、专类公园和游园。其中游园因面积较小、功能相对简单，不纳入研究范畴。本研究选取南京市辖区范围内15处城市公园（图2），所选公园分布于玄武、鼓楼、建邺、秦淮、江宁等行政区，覆盖了南京不同区域、不同规模的公园类型，确保了样本的多样性和代表性。

2.2 数据收集与处理

研究所需数据根据碳吸收量和碳排放量计算分为两个部分。碳吸收量计算部分数据包括15个案例公园的0.75 m分辨率吉林1号卫星图像、2010–2019年南京气象数据、植被种

类数据和LAI数据。气象数据来源于国家气象科学数据共享服务平台的“中国地面气候资料日值数据集”，在Stata MP18中对数据进行清洗，得到2010–2019年南京市降雨大于5 mm的天数，取10年的平均值为研究数据。通过场地实测获取各个案例公园的树种数据。调查地块数量根据公园规模而定，按乔灌木总面积成比例取样，每公顷调查总面积的百分之一，即100 m^{2[28]}，以面积为10 m×10 m的正方形或近似正方形为样地。实地调查时间为2023年10月至2024年2月。使用Earth 地球软件记录每个样地的中心和地块内植物位置及植物种类情况。案例公园植被LAI实测时间为2023年9月–11月。使用植物冠层分析仪（24MP DSLR Compact 0Mount）对样地每种乔木及灌木进行4次LAI测量，取平均值作为该种植物的LAI值^[5]。不同树种的单位叶面积固碳速率参照董延梅等^[29]测定的杭州市公园57种常用园林树木的单位叶面积固碳速率数据。若缺少对应树种数据，选择同科属或相似树种进行替代。根据《2006年IPCC国家温室气体清单编制指南》^[30]估计，每1 mg有机碳相当于3.66 mg的CO₂。

碳排放计算部分的数据收集和处理包括分析提取所有案例公园的不同用地类型面积，以及照明、绿色废弃物、施肥、施药和建筑运维等情况的调研。照明数据以高杆灯为主要照明设备，每盏灯泡平均功率为45 w；依据《城市夜景照明设计标准（JGJ/T 163-2008）（修订征求意见稿）》^[31]规定，综合公园里公共活动场所最小水平照度为5 lx。城市园林绿化垃圾^[32]的平均产生量约为每年1.00 ~ 1.50 kg/m²，本研究按照每年1.50 kg/m²计算。在施肥环节，乔木和灌木的施肥标准不同，且均包括基肥和追肥。乔木施肥涉及每平方米的基肥和追肥量、乔木面积、施肥次数及碳排放系数。

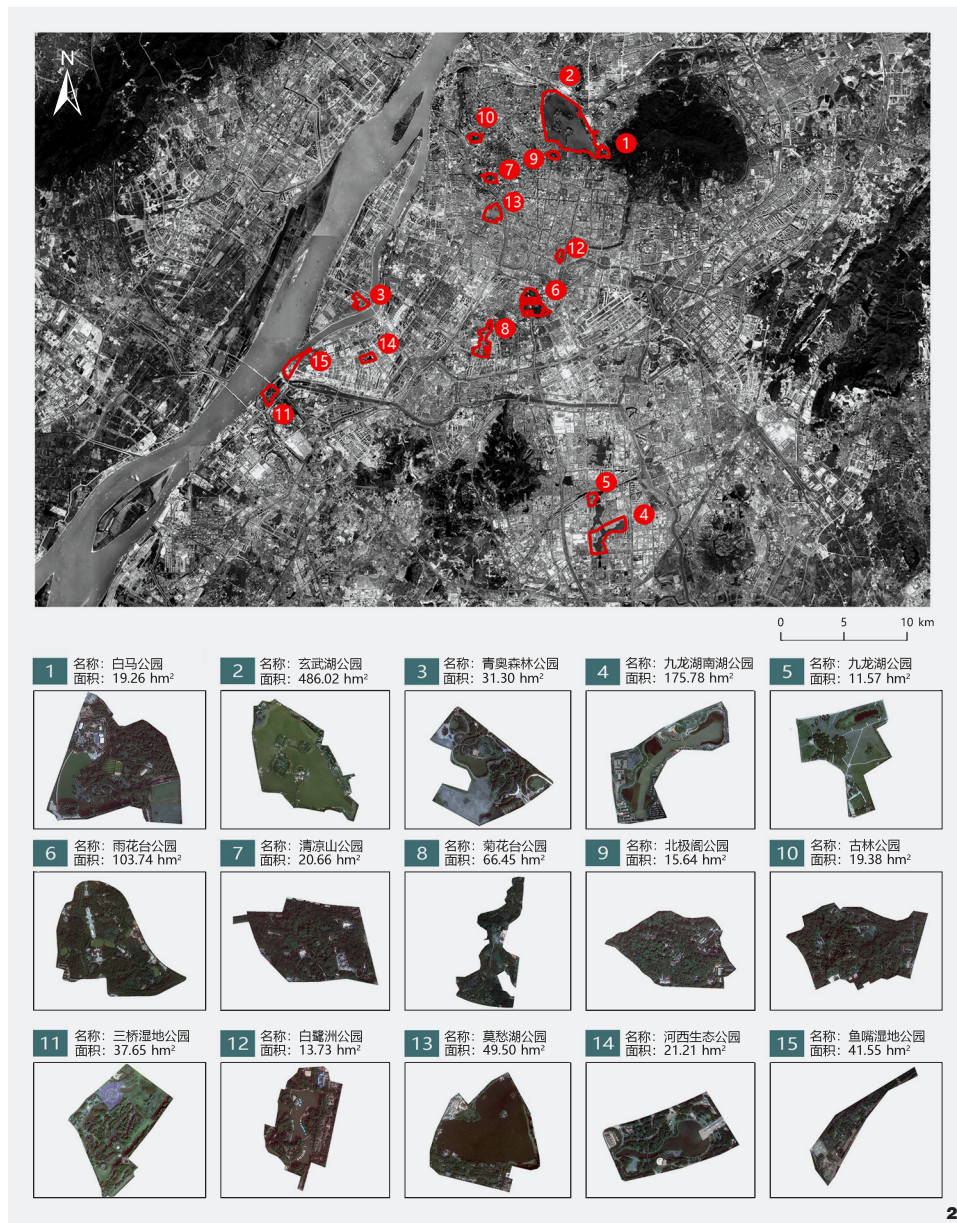


图2 案例分布及卫星影像
Fig. 2 Case park location distribution and satellite map

依据《江苏省城市园林绿化养护管理规范及分级标准 (DB32/T 2061-2011)》^[33] 规定, 基肥为腐熟有机肥, 追肥为复合化肥, 均施用一次, 施肥量分别为 0.11 kg/m² 和 0.56 kg/m²。灌木施肥参数类似, 但追肥次数为两次, 施肥量分别为 0.5 kg/m² 和 0.15 kg/m²。在施药部分中,

碳排放计算包括绿地面积、单位面积农药施用量、施药次数和碳排放系数。依据《江苏省城市园林绿化养护管理规范及分级标准 (DB32/T 2061-2011)》^[33] 规定, 单位绿地农药施用量为 45 g/m² (3 kg/亩), 每年至少施药 5 次。景观水体的碳排放量数据参考 Fan 等^[34] 对景

观水体碳通量的实测研究。公园内建筑运维数据以建筑单位面积年碳排放量为 33 kg^[20] 进行计算。

此外, 从碳源和碳汇两个方面选择了景观要素指标, 包括乔木面积、草坪面积、乔木覆盖率、绿地率、岸线长度、水面率、硬质面积、硬质率和建筑面积 9 个城市公园景观要素指标, 采用随机森林的方法结合碳平衡评估结果, 进一步探讨影响城市公园碳平衡实现的关键要素。由于碳平衡系数与城市公园景观要素指标之间为非线性相关关系, 采用机器学习的随机森林方法进行关联量化研究。将各个景观要素指标视为解释变量, 碳平衡系数作为因变量。首先, 在 ENM 软件中采用基于目标的图像分类方法, 计算案例公园的乔木面积、绿地中草坪面积、乔木覆盖率、绿地率、水面率、硬质面积、硬质率和建筑面积等指标值; 岸线长度由 ArcGIS 软件中的周长计算器量取。

3 碳平衡评估结果分析

首先分析对比 15 个城市公园的碳吸收总量, 以及各个公园乔木和灌木碳吸收量和碳吸收率。随后, 分析案例公园的总碳排放量, 对比研究不同的碳排放项目计算结果, 分析不同公园的碳平衡系数。此外, 探讨影响碳平衡的景观要素, 并识别关键要素。

3.1 碳吸收情况

从表 2 来看, 雨花台公园的叶面积总量最多, 高达 2 231 909.05 m², 九龙湖公园的叶面积总量最少, 仅有 120 986.35 m²。玄武湖公园和菊花台公园总量也相当可观, 这三个公园的叶面积总量在 15 个公园中位列前三。在植被日碳汇量方面, 菊花台公园同样拥有最多的植被日碳汇量, 每天能吸收

44 266.59 kg的CO₂, 玄武湖公园其次, 日碳汇量为36 348.89 kg。

15个案例公园的碳吸收计算结果如图3所示。菊花台公园、雨花台公园和玄武湖公园的年度碳吸收量最多, 分别为725.09×10⁴ kg、516.18×10⁴ kg和470.09×10⁴ kg。相较而言, 九龙湖公园、白鹭洲公园和莫愁湖公园年度碳吸收量较少, 分别为48.30×10⁴ kg、51.97×10⁴ kg和83.04×10⁴ kg, 三个公园的碳吸收量总和仅占所有公园碳吸收总量的5.39%。通过分析乔木和灌木的碳吸收率可发现, 菊花台公园的乔木和灌木碳吸收率均较高, 分别为11.50 kg/m²和11.90 kg/m²。所有15个案例中, 白马公园、青奥森林公园、九龙湖公园、清凉山公园、北极阁公园、古林公园、白鹭洲公园、河西生态公园和鱼嘴湿地公园9个公园的乔木碳吸收率比灌木更高, 其他案例公园的乔木碳吸收率均小于灌木。

3.2 碳排放情况

案例公园的碳排放量计算结果如图4所示, 玄武湖公园的总碳排放量最高, 达到1 489.03×10⁴ kg, 白鹭洲公园的总碳排放量最低, 为85.79×10⁴ kg。在照明部分, 九龙湖南湖公园产生的碳排放量最多, 达841.63×10⁴ kg, 占有所有公园的59.09%。灌溉产生的碳排放量总量相对较小, 但不同公园之间存在巨大差异。如, 玄武湖公园灌溉的碳排放量最多, 为10.54×10⁴ kg, 而白鹭洲最少, 为0.51×10⁴ kg, 前者的碳排放量是后者的20.65倍。玄武湖公园因施肥和施药而产生的碳排放量, 在所有公园中均为最多。九龙湖南湖公园建筑运维产生的碳排放量最高, 为219.08×10⁴ kg, 其次是玄武湖公园和北极阁公园, 九龙湖公园建筑运维产生的碳排放量最少, 仅为1.98×10⁴ kg。玄武湖公园景观水体的

表2 碳吸收量计算结果比较

Tab. 2 Comparison of calculation results of carbon absorption

序号 No.	名称 Name	叶面积总量 /m ² Total leaf area	植被日碳汇量 /kg Daily carbon sink by vegetation	年碳吸收量 /kg Annual carbon uptake
1	白马公园	264 933.78	5 729.34	938 466.29
2	玄武湖公园	1 833 685.49	36 348.89	4 700 915.16
3	青奥森林公园	462 892.32	14 039.21	1 862 307.95
4	九龙湖南湖公园	1 216 627.16	26 313.23	3 658 937.05
5	九龙湖公园	120 986.35	4 464.44	482 980.11
6	雨花台公园	2 231 909.05	34 911.64	5 161 822.00
7	清凉山公园	354 907.03	7 679.92	1 027 501.25
8	菊花台公园	1 697 920.25	44 266.59	7 250 866.82
9	北极阁公园	273 347.55	7 355.97	1 204 907.32
10	古林公园	314 020.61	5 725.99	937 916.49
11	三桥湿地公园	685 691.40	10 989.28	1 699 934.59
12	白鹭洲公园	187 620.66	3 172.52	519 657.99
13	莫愁湖公园	299 810.48	5 069.56	830 393.18
14	河西生态公园	295 852.62	7 944.68	1 301 337.77
15	鱼嘴湿地公园	833 578.92	23 073.09	2 383 449.95

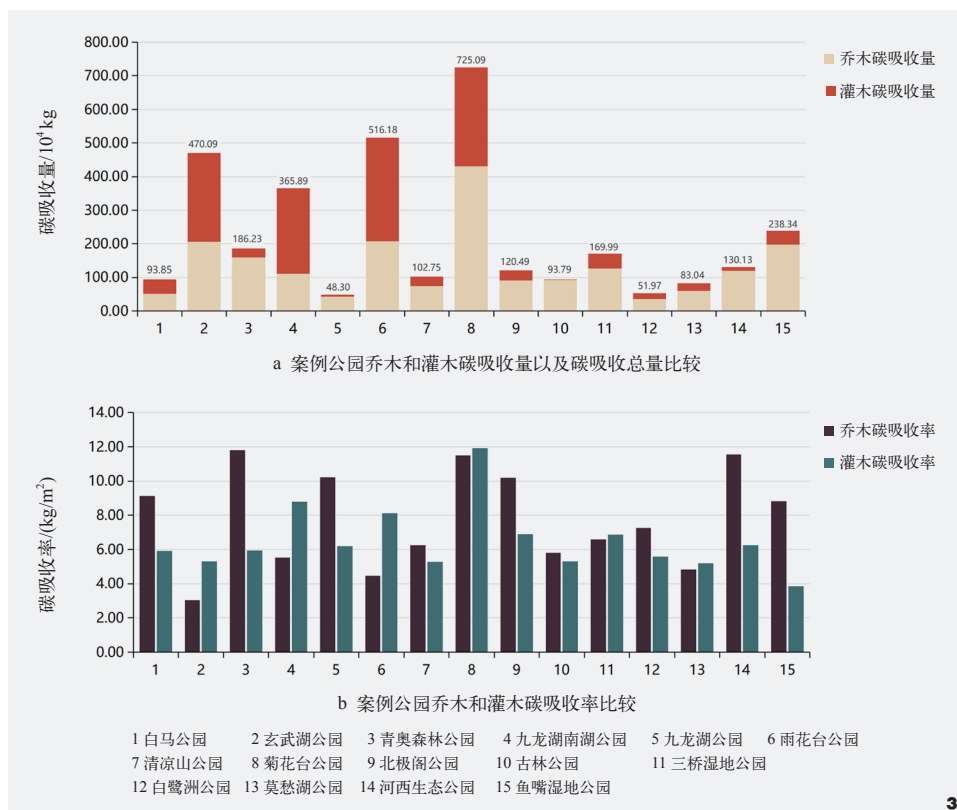


图3 碳吸收量分析
Fig. 3 Carbon uptake assessment

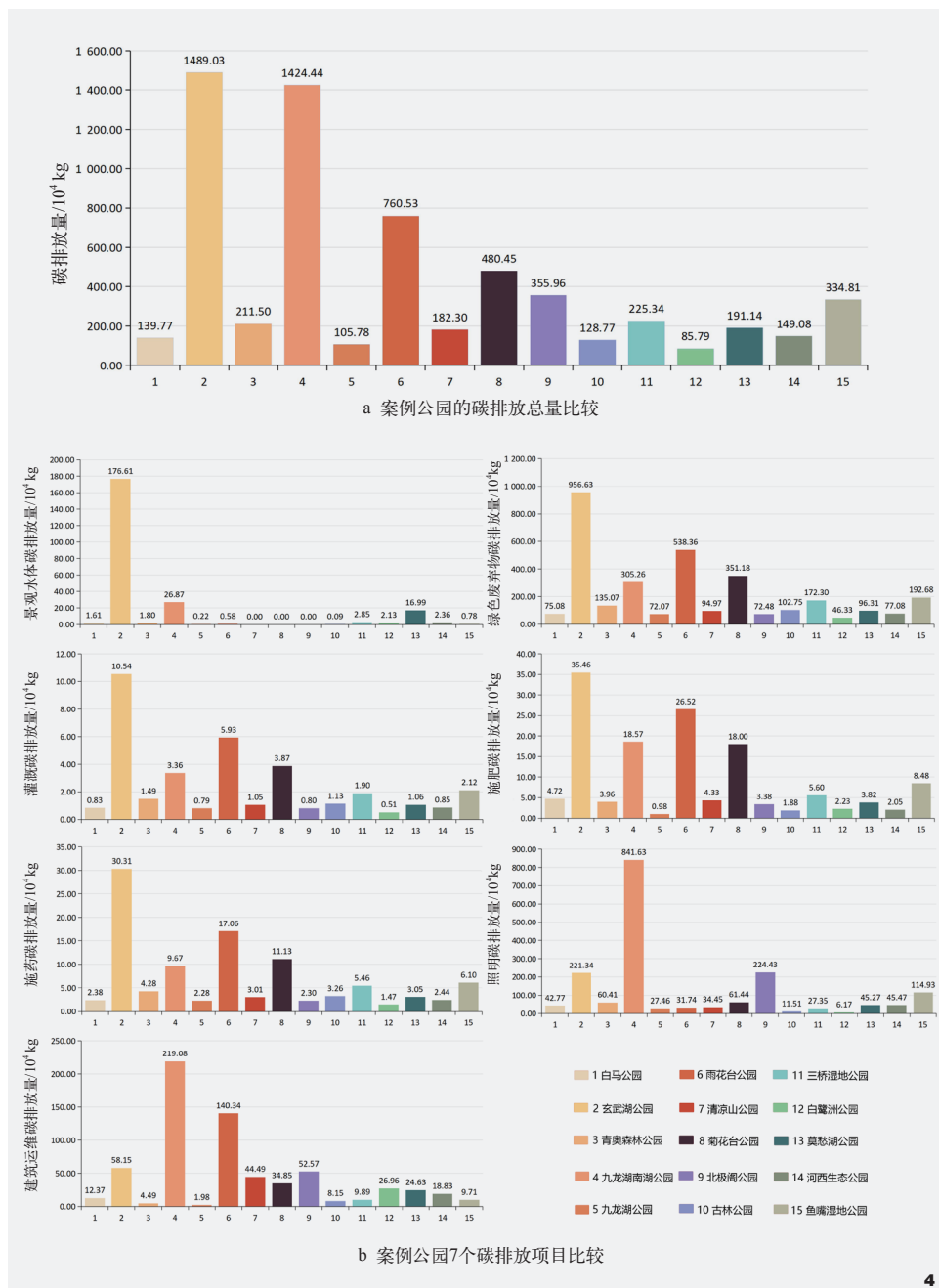


图4 碳排放量分析
Fig. 4 Carbon emission assessment

碳排放量最高，为176.61×10⁴ kg。北极阁公园、菊花台公园和清凉山公园内没有水体，所以上述公园的水体碳排放量为0。所有公园的绿色废物处理碳排放量普遍较高，其中

玄武湖公园最高，每年有956.63×10⁴ kg的碳排放量。

图5为15个案例公园各个碳排放项目的碳排放量占比，较为显著的碳排放来源是照

明、绿色废弃物和建筑运维。灌溉碳排放量占比最高的是古林公园，为0.88%，最低的是北极阁公园，为0.22%。照明的碳排放量占比不同公园差距较大，九龙湖南湖公园照明碳排放占公园总体的59.08%，而雨花台公园照明占比仅为4.17%。施肥和施药碳排放占比在所有公园中占比均较小，施肥的碳排放量占比最高的是菊花台公园，为3.75%，最低的是九龙湖公园，仅占0.93%。施药的碳排放量占比最高的是古林公园，为2.53%，最低的是北极阁公园，仅占0.65%。在建筑运维方面，清凉山公园和白鹭洲公园较高，分别为24.40%和31.43%。景观水体的碳排放量占比最高的是玄武湖公园，为11.86%。绿色废弃物的碳排放量占比最高的是古林公园，为79.79%，最低的是北极阁公园，为20.36%。

3.3 碳平衡评估结果

基于15个案例公园的碳排放量与碳吸收量计算结果(图6)，获得各个公园的年度碳平衡系数，如表3所示，有14个公园的碳平衡系数大于1，仅有菊花台公园的碳平衡系数小于1，为0.66。由此可知，绝大部分城市公园呈现了负向碳平衡特征，即是城市的碳源。玄武湖公园和九龙湖南湖公园的碳平衡系数最大，分别为3.17和3.89。九龙湖公园、莫愁湖公园和北极阁公园的碳平衡系数分别2.19、2.30和2.95。上述案例公园的碳排放量远大于碳吸收量，是典型的碳源。除此以外，其余案例公园的碳排放量和碳吸收量的比率基本持平，碳排放量微大于碳吸收量，具有较大的碳平衡潜力，包括白马公园(1.49)、青奥森林公园(1.14)、雨花台公园(1.47)、清凉山公园(1.77)、古林公园(1.37)、三桥湿地公园(1.33)、白鹭洲公园(1.65)、河西生态公园(1.15)和鱼嘴湿地公园(1.40)。

表3 碳平衡系数
Tab. 3 Carbon balance coefficient

序号 No.	名称 Name	碳平衡系数 Carbon balance coefficient
1	白马公园	1.49
2	玄武湖公园	3.17
3	青奥森林公园	1.14
4	九龙湖南湖公园	3.89
5	九龙湖公园	2.19
6	雨花台公园	1.47
7	清凉山公园	1.77
8	菊花台公园	0.66
9	北极阁公园	2.95
10	古林公园	1.37
11	三桥湿地公园	1.33
12	白鹭洲公园	1.65
13	莫愁湖公园	2.30
14	河西生态公园	1.15
15	鱼嘴湿地公园	1.40

4 影响碳平衡的景观要素指标分析

采用机器学习的随机森林方法进行关联量化研究的计算结果如图7所示，按特征重要性降序排列，绿地率、硬质面积、建筑面积三个景观要素指标与碳平衡呈显著相关，重要性依次为37.60%、25.90%、11.40%。乔木面积、草坪面积、乔木覆盖率、岸线长度、水面率、硬质率与碳平衡系数则没有显著相关性。

5 讨论

5.1 不同城市公园碳平衡的差异性

本研究发现城市公园虽然由大规模的绿地构成，但其并不一定扮演了碳汇的角色，起到消减城市中CO₂的作用。在南京的15个城市公园案例中，14个案例为碳源，呈现了负向碳平衡特征，仅有一个公园为碳汇。唯一真正具有碳汇效能的菊花台公园具有较高

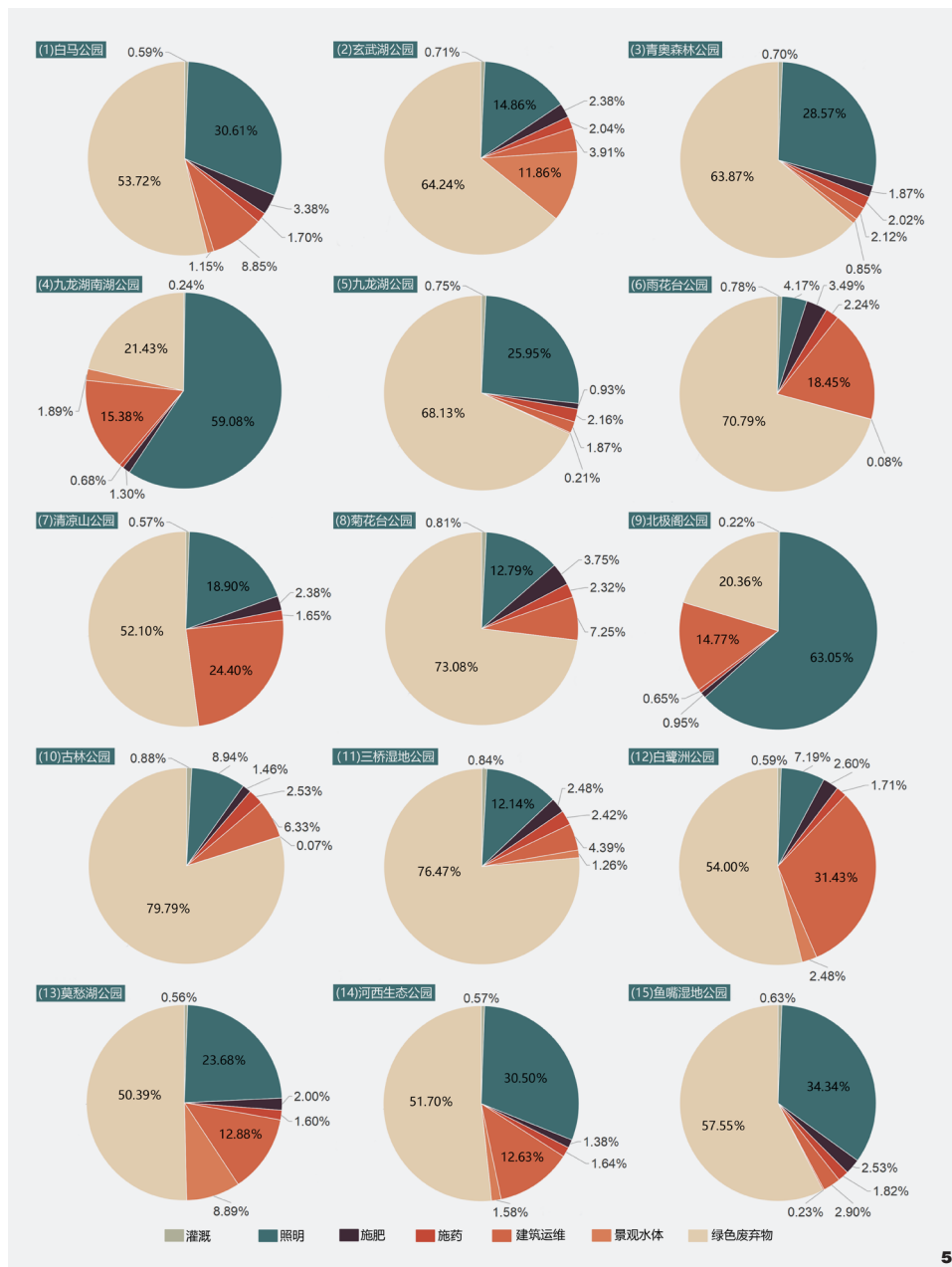
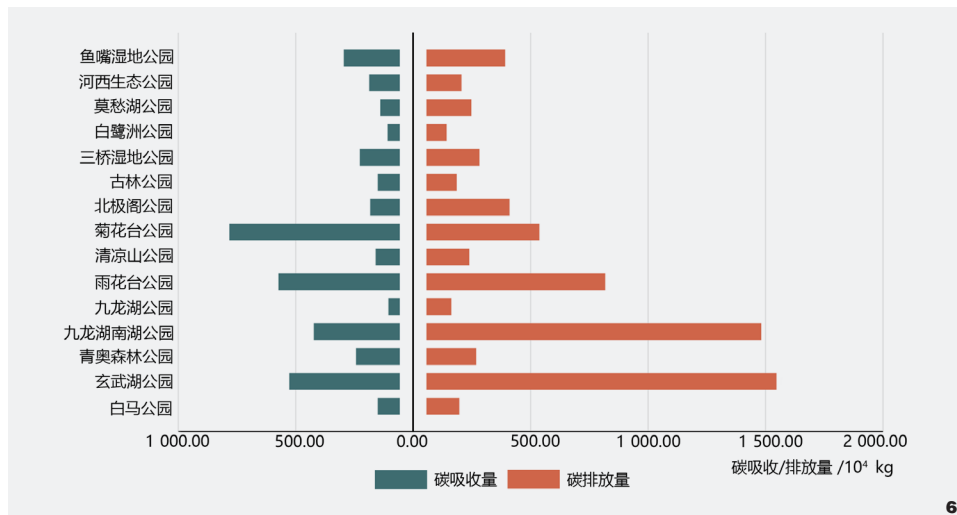


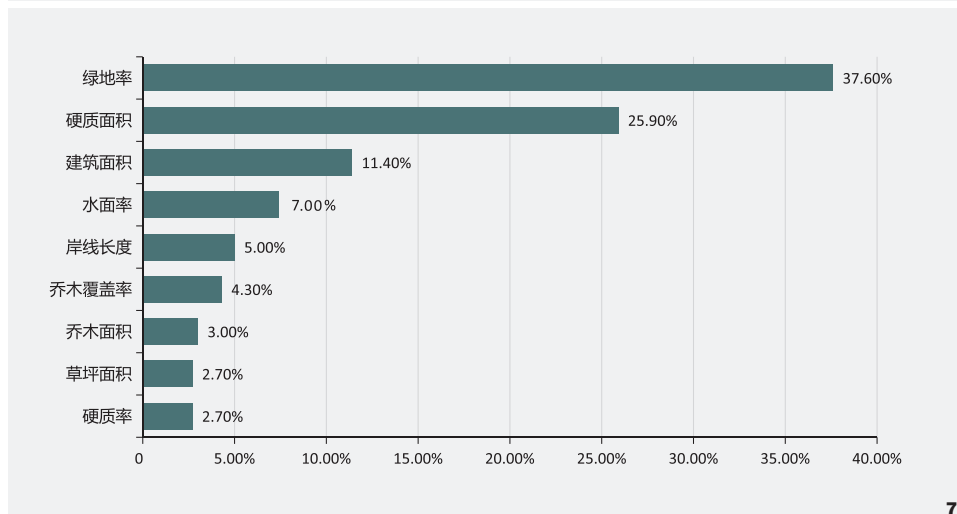
图5 不同碳排放项目的占比
Fig. 5 Proportion of different carbon emission projects

的绿地覆盖率，其中的硬质景观与配套建筑设施较少。玄武湖公园、九龙湖南湖公园、九龙湖公园、莫愁湖公园和北极阁公园的碳平衡系数显著高于其他公园，表明其碳排放量远超过碳吸收量。综合分析来看，上述公

园碳排放量较高的原因在于日常人流量大、使用频率高，且具有高养管特征。尽管15个研究案例的面积存在显著差异，但碳平衡系数与其不存在直接关联。白马公园、青奥森林公园、雨花台公园、清凉山公园、古林公



6



7

图6 碳吸收量和碳排放量对比
Fig. 6 Comparison of carbon uptake and emissions

图7 9个景观要素指标的重要性排序
Fig. 7 Ranking the importance of the 9 impact factors

园、三桥湿地公园、白鹭洲公园、河西生态公园和鱼嘴湿地公园的碳排放量与碳吸收量基本持平，具有成为城市碳汇的潜力。

5.2 影响碳平衡的关键景观要素

根据影响碳平衡的景观要素指标的研究，绿地率对碳平衡系数的贡献度高达37.6%，突显了绿地率在城市公园碳平衡中重要作用，即公园中绿地的规模对碳的吸收和

排放具有决定性影响。当下城市公园日常运维中常见的高养管情况，植物养管活动会存在一定程度的碳排放，由此绿地率的增加也可能伴随着碳排放量的上升。清凉山公园和河西生态公园两者在总面积和植被覆盖面积上相似，但河西生态公园的碳吸收量显著高于清凉山公园，反映了有一定景观水体的城市公园在碳吸收方面有着更好的效益。根据过往研究，水体不仅能够促进植物生长，还

有助于植物更有效地吸收和储存碳^[35]。基于此，水岸线长度的增加带来水体与绿地更大的接触面积，在某种程度上可促进绿地碳汇效能的发挥。

城市公园中的硬质面积与建筑面积对碳平衡系数同样具有显著影响。城市公园在促进居民的休闲体育活动方面扮演着关键角色^[36-37]，公园内的硬质和建筑设施是人群休闲活动的场所，但却增加了碳排放。例如，照明和建筑运维是长期且主要的碳排放源。Zhang等^[7]对中国绿地时间跨度50年的碳汇与碳排放进行评估，指出灌溉和农药使用是公园碳排放的主要因素。Nicese等^[8]对城市公园中5种绿地类型在50年间的碳平衡进行研究，发现绿色废物处理及其相关干预措施则产生了较高的碳排放。而本文以年为跨度的研究发现，绿色废弃物、照明和建筑运维是城市公园碳排放的主要来源。

5.3 以碳汇能力提升为目标的公园更新与管理

过往从全生命周期角度的研究认为城市绿地具有碳汇功能^[7]，但本文研究发现以年为跨度的评估中，大多数城市公园实际扮演着碳源的角色。作为城市中重要的休闲开放空间，公园因其职能需求，制约碳汇功能的发挥；然而，公园又是城市绿地的构成主体之一，有着发挥碳汇等生态系统服务功能的诉求。城市高品质发展与存量更新的背景下，在关注公园数量和密度增长的同时，已建成公园在质量方面的提升不容忽视。城市公园具有生活、生态、文化等多重价值，在当下的更新中应突出生态与形态统一，在尊重生态本底的基础上，构建和优化空间形态和功能，兼顾生态服务功能和健康福祉效能的发挥。在空间更新与建构中，根据使

用现状, 识别高频活动空间与高效生态空间, 在满足人群活动需求的同时, 实现“两高三低”目标, 即高碳汇、高绩效与低消耗、低维护、低排放, 打造“零碳”公园或“碳循环”公园。

5.4 研究局限与展望

城市公园碳收支计算涉及的内容较多, 部分数据在当下获取具有一定难度, 所以本文借鉴了相关研究成果, 在乔木与灌木的碳吸收量估算中可能存在一定误差。此外, 没有将一些可能存在碳排放的情况纳入评估框架, 例如游客活动等产生的碳排放。绿色废弃物是城市公园碳排放的重要组成部分, 包括直接处理植被枯枝落叶等绿色废弃物本身及运输等活动产生的碳排放。由于不同公园的管理部门在运输废弃物时使用的运输车辆类型、行驶路程以及运输频次等数据收集较为困难, 由此未将该部分内容纳入计算范畴。在未来, 借助数字孪生与物联网技术, 能够获取城市公园各个部门实时养管情况及更为全面、精确的基础数据, 从而更加精准地实施城市公园碳平衡评估。

6 结论

本研究构建了城市公园碳平衡评估框架, 结合实地调研与数据收集, 评估了南京15个城市公园的碳平衡情况, 并采用随机森林算法, 明确了影响城市公园碳平衡的关键景观要素指标, 主要研究结论如下:

(1) 不同城市公园的年度碳平衡情况存在差异性, 根据15个案例的研究, 绝大多数公园实际是城市的“碳源”, 并没有发挥碳汇效能。但9个案例的碳排放量与碳吸收量基本持平, 具有成为城市碳汇的潜力。

(2) 公园的面积及其中绿地面积越大,

碳吸收能力也越强; 人流量大、使用频率高、高养管的城市公园碳排放量较大, 照明、绿色废弃物和建筑运维是主要来源。

(3) 城市公园的绿地率、硬质面积和建筑面积这三个因素与碳平衡的实现密切相关, 而乔木面积、草坪面积、乔木覆盖率、岸线长度、水面率、硬质率对碳平衡没有显著影响。景观水体能提升城市公园的碳吸收能力。

城市公园作为城市绿地的重要组成部分, 不仅承担着提供生态系统服务的职责, 还在提升社会健康福祉方面发挥着关键作用。在其所提供的生态系统服务中, 碳汇能力尤为关键, 而这一能力与绿地率密切相关。此外, 考虑到城市公园对公众健康和社会福祉的积极影响, 精细化的管理和维护显得尤为重要。但对于当下而言, 建设后日常运维的高投入已成为公园管理机构面临的重要问题, 也给城市财政带来较大压力。本研究通过案例的实证, 揭示城市公园在碳循环中扮演的实际角色, 识别影响城市公园碳平衡的关键景观要素, 为城市公园的更新与改造提供数据支持, 也能够为运维管理的优化提供参考。

注: 文中图表均由作者绘制。

参考文献

- [1] 张丽, 刘子奕, 麻欣瑶, 等. 植物群落特征对城市公园绿地碳汇效能的影响研究[J]. 园林, 2023, 40(04): 125-134.
- [2] 杨菲, 王洪成. 规划设计实践视角下城市绿地碳汇与碳排研究成果可用性述评[J]. 园林, 2023, 40(03): 71-78.
- [3] SHADMAN S, KHALID P A, HANAFIAH M M, et al. The Carbon Sequestration Potential of Urban Public Parks of Densely Populated Cities to Improve Environmental Sustainability[J]. Sustainable Energy

- Technologies and Assessments, 2022, 52: 102064.
- [4] COSTANZA R, D'ARGE R, DE GROOT R, et al. The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital[J]. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.
- [5] HOUGHTON R A. Why are Estimates of the Terrestrial Carbon Balance so Different?[J]. Global Change Biology, 2003, 9(4): 500-509.
- [6] 林奕成, 易扬, 张浪, 等. 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[J]. 园林, 2024, 41(08): 140-146.
- [7] ZHANG Y, MENG W, YUN H, et al. Is Urban Green Space a Carbon Sink or Source?: A Case Study of China Based on LCA Method[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2022, 94: 106766.
- [8] NICESE F P, COLANGELO G, COMOLLI R, et al. Estimating CO₂ Balance through the Life Cycle Assessment Prism: A Case Study in an Urban Park[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2021, 57: 126869.
- [9] WANG C, ZHAN J, ZHANG F, et al. Analysis of Urban Carbon Balance Based on Land Use Dynamics in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 281: 125138.
- [10] MA L, XIANG L, WANG C, et al. Spatiotemporal Evolution of Urban Carbon Balance and Its Response to New-type Urbanization: A Case of the Middle Reaches of the Yangtze River Urban Agglomerations, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 380: 135122.
- [11] LIU J, PEI X, ZHU W, et al. Multi-scenario Simulation of Carbon Budget Balance in Arid and Semi-arid Regions[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 346: 119016.
- [12] ZHAO D, CAI J, XU Y, et al. Carbon Sinks in Urban Public Green Spaces Under Carbon Neutrality: A Bibliometric Analysis and Systematic Literature Review[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2023: 128037.
- [13] SNEHLATA, RAJLAXMI A, KUMAR M. Urban Tree Carbon Density and CO₂ Equivalent of National Zoological Park, Delhi[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2021, 193(12): 841.
- [14] RANA G, MARTINELLI N, FAMULARI D, et al. Representativeness of Carbon Dioxide Fluxes Measured by Eddy Covariance over a Mediterranean Urban District with Equipment Setup Restrictions[J]. Atmosphere, 2021, 12(2): 197.
- [15] WANG Y, CHANG Q, LI X. Promoting Sustainable Carbon Sequestration of Plants in Urban Greenspace by Planting Design: A Case Study in Parks of Beijing[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2021, 64: 127291.

- [16] BISWAS S, BALA S, MAZUMDAR A. Diurnal and Seasonal Carbon Sequestration Potential of Seven Broadleaved Species in a Mixed Deciduous Forest in India[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 89: 827-834.
- [17] MCPHERSON E G, KENDALL A. A Life Cycle Carbon Dioxide Inventory of the Million Trees Los Angeles Program[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2014, 19: 1653-1665.
- [18] ALY D, DIMITRIJEVIC B. Systems Approach to the Sustainable Management of Urban Public Parks[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2022, 68: 127482.
- [19] LI X, ZHANG S, HUANG R, et al. Diversity and Distribution Variation of Urban Spontaneous Vegetation with Distinct Frequencies Along River Corridors in a Fast-growing City[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 333: 117446.
- [20] 徐诗, 王成, 孙振凯, 等. 北京综合性社区鸟类与植物的关系[J]. *中国城市林业*, 2022, 20(02): 15-22.
- [21] 陈自新, 苏雪痕, 刘少宗, 等. 北京城市园林绿化生态效益的研究(3)[J]. *中国园林*, 1998(03): 51-54.
- [22] 陈袁波. 不同水体温室气体排放通量变化规律及其影响因素研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2022.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑碳排放计算标准: GB/T 51366-2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [24] WANG Z, CHEN J, MAO S, et al. Comparison of Greenhouse Gas Emissions of Chemical Fertilizer Types in China's Crop Production[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 141: 1267-1274.
- [25] 萧箫, 陈彤, 郑中华, 等. 上海公园绿化养护碳排放量计算研究[J]. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 2013, 31(1): 67-71.
- [26] 国家统计局能源统计司. 2009中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2010.
- [27] 杨子艺, 胡姗, 徐天昊, 等. 面向碳中和的各国建筑运行能耗与碳排放对比研究方法及应用[J]. *气候变化研究进展*, 2023, 19(06): 749-760.
- [28] 江南, 徐卫华, 赵娟娟, 等. 城市植物地面抽样调查方法综述[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2021, 43(03): 587-597.
- [29] 董延梅. 杭州花港观鱼公园57种园林树木固碳效益测算及应用研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2014.
- [30] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[M]. Japan: IPCC, 2006.
- [31] 住房和城乡建设部办公厅. 城市夜景照明设计标准(修订征求意见稿)[EB/OL]. (2023-08-22)[2024-10-23]. <https://www.ezhujian.cn/xwdt/zqyj/10475.html>
- [32] PENG Y, WANG Y, CHEN H, et al. Carbon Reduction Potential of a Rain Garden: A Cradle-to-grave Life Cycle Carbon Footprint Assessment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 434: 139806.
- [33] 江苏省住房和城乡建设厅. 江苏省城市园林绿化养护管理规范及分级标准: DB32/T 2061-2011[S]. 南京: 江苏省住房和城乡建设厅, 2015.
- [34] FAN L, CHENG J, XIE Y, et al. Spatio-temporal Patterns and Drivers of CH₄ and CO₂ Fluxes from Rivers and Lakes in Highly Urbanized Areas[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 918: 170689.
- [35] KOLADA A. The Effect of Lake Morphology on Aquatic Vegetation Development and Changes under the Influence of Eutrophication[J]. *Ecological Indicators*, 2014, 38: 282-293.
- [36] CHENG Y, ZHANG J, WEI W, et al. Effects of Urban Parks on Residents' Expressed Happiness Before and During the COVID-19 Pandemic[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2021, 212: 104118.
- [37] YOUNGBLOOM A J, THIERRY B, FULLER D, et al. Gentrification, Perceptions of Neighborhood Change, and Mental Health in Montréal, Québec[J]. *SSM-population Health*, 2023, 22: 101406.