

公园绿地建设的碳中和效应研究: 基于乔木与建筑物的碳中和预测模型与应用模拟

袁红 刘子奕 周亦璟 秦浩喆 邵继中*

摘要: 城市绿地的碳中和时间节点尚不明确, 而乔木年固碳速率的计算往往缺乏对非线性生长速率的考虑。因此, 首先, 依据胸径-生物量模型计算出规定时间内每株乔木的固碳量增量, 并与胸径增量(ΔDBH)建立了拟合方程。其次, 以公园中建筑物碳排放量为目标, 通过拟合方程求解出剩余的 ΔDBH , 并反推出树木还需生长的时长, 从而实现碳中和时间点的预测。2个虚拟公园(A与B)的乔木、建筑物规格均基于华东与华南地区的公园项目资料建立, 并被应用于预测模型的验证工作中。结果表明, 2个公园达到碳中和的预测日期(2038年10月、2035年4月)皆晚于直接通过固碳速率预测的日期(2032年4月、2030年5月), 误差率分别为56.7%与57.7%。研究强调, 完全依赖乔木碳汇中和建筑建材碳排放需要很长时间, 而就地取材、使用零碳建材等措施会大幅缩短碳中和时长。研究为城市公园建设提供了一套碳中和预测模型和软件, 能够基于项目工程量清单直接计算, 大幅降低了工作量, 并为企业与决策者提供了方案优化的指导信息。

关键词: 风景园林; 固碳; 生物量; 拟合; 胸径; 建筑材料

文章编号: 1000-6664(2026)03-0045-08

DOI: 10.19775/j.cla.2026.03.0045

中图分类号: TU 986

文献标志码: A

收稿日期: 2024-05-23

修回日期: 2025-02-18

基金项目: 教育部项目人文社科一般项目(22YJCZH226); 四川省国际科技创新合作/港澳台科技创新合作项目(2024YFHZ0220)

“双碳”目标下, 城市公园作为重要的绿色基础设施, 其固碳功能在应对气候变化中的作用日益凸显^[1-7]。乔木是城市绿地主要的碳汇来源^[8], 现有研究多基于样方实测或遥感技术, 利用异速生长方程估算其生物量及碳储量^[5, 9-20], 并核算其固碳量和产氧量以衡量其经济价值^[21], 考虑其时序变化机制^[22]。此外, i-Tree和CTCC等模型工具的开发, 进一步实现了基于清查数据的碳汇快速评估^[23-25]。

然而, 现有研究在指导工程实践方面仍存在局限: 一是鲜少关注场地实现碳中和的具体时间节点, 忽略了植被固碳效率随生长呈非线性变化的特征, 难以精准预测碳中和进程^[26]; 二是往往忽视公园内建筑虽占地小但隐含碳排放巨大的事实, 导致评估不完整^[9]; 三是传统林业清查方法成本高、效率低, 且不兼容城市公园的小尺度与人工干预特性, 难以满足项目设计阶段快速测算的需求^[10, 26]。综合来看, 建立异速生长方程并优化树木清查流程更具可行性^[27-28]。

综上, 本研究旨在开发一款基于工程量清单的碳中和时间预测模型。该模型通过计算建

筑碳排放与植被固碳量, 利用树木胸径(DBH)增量模拟生长过程, 反推公园实现碳中和及经济损益平衡的时间节点, 并最终集成软件工具(图1), 以期为低碳导向的公园设计与管理提供科学依据。

1 研究方法

1.1 数据收集与整理

为确保模型在不同气候区的普适性, 本研究收集了华东与华南地区20个公园项目的工程量清单与设计图纸, 提取苗木规格、数量及建筑材料数据, 并结合实测与文献数据补充DBH信息^[29-42]。基于上述数据, 构建了2个具备区域代表性的虚拟公园模型(公园A与公园B), 分别模拟不同地区的植被配置与建筑体量^①。模型中苗木成活率设定为90%, 以排除施工水平差异对后续对比分析的影响。

1.2 胸径-生物量模型和固碳释氧量计算

1.2.1 胸径-生物量模型

采用胸径-生物量异速生长方程估算乔木生物量。该方法以DBH为单一变量, 适用于工程

清单数据的快速提取。选用嵌套式回归模型及相关学者提出的常绿与落叶乔木通用方程进行计算^[43-45]。其公式如下:

$$W=0.0413DBH^{2.5031} \quad (1)$$

$$\ln W_{常绿阔叶}=2.279+2.287\ln DBH \quad (2)$$

$$\ln W_{常绿针叶}=4.181+1.949\ln DBH \quad (3)$$

$$\ln W_{落叶阔叶}=3.562+2.665\ln DBH \quad (4)$$

$$\ln W_{落叶针叶}=1.895+2.282\ln DBH \quad (5)$$

式中: W 为生物量(kg); DBH 为树木胸径(cm)。

1.2.2 碳储量估算

植被碳储量由生物量乘以转换系数(约0.5)得出^[21]。通过计算公园投入使用期间(建成时至当前)的生物量差值, 得出树木的碳储变化量:

$$\Delta Q=Q_{after}-Q_{before}=a(W_{after}-W_{before}) \quad (6)$$

式中: ΔQ 为碳储变化量; Q_{after} 为改造后碳储量; Q_{before} 为改造前碳储量; a 为转化系数(取0.493 7); W_{after} 为改造后生物量; W_{before} 为改造前生物量。

1.3 基于建筑环境负荷评价体系的碳排放核算

1.3.1 建材生产阶段碳排放量估算

基于建筑环境负荷评价体系, 重点核算建材

* 通信作者(Author for correspondence) E-mail: shao.j.z@hotmail.com

生产与循环利用阶段的碳排放^[46](表1)。

1.3.2 建材再循环阶段碳排放量估算

建筑材料的再回收利用是指材料在受损后通过二次加工处理可以再循环利用。具备可回收性的建筑材料包括钢筋、型钢、建筑玻璃、铝合金、木材等。建筑玻璃和木材虽能回收，但是再使用时不会用于建筑，所以只考虑型钢、钢筋、铝材的回收。钢筋回收系数为0.50，型钢为0.90，铝材为0.95。

在建材再利用的过程中，也会产生大量的CO₂。中国回收钢材重新加工的能耗在20%~50%，取40%进行计算；铝材再利用生产能耗为5%~8%，取6%进行计算。因此，考虑了再生利用性后，每吨型钢、钢筋、铝材的碳排放量分别为1.40、0.92和1.02 t。

1.3.3 建筑物对环境总影响计算(总碳排放量)

$$P = \sum_{i=1}^n B_i [X_i (1-a) + aXr_i]$$
 (7)

式中：*P*为建筑物总碳排放量；*X_i*为第*i*种建筑材料生产过程中单位重量排放CO₂的指标(t)；*B_i*为单体建筑所用第*i*种建筑材料的重量总和(t)；*a*为一单体建筑所用第*i*种建筑材料的回收系数；*Xr_i*为单体建筑所用第*i*种建筑材料的回收过程排放CO₂的指标(t/t)。

1.4 碳中和时间预测与软件实现

本研究构建“树木碳汇量-DBH增量(ΔDBH)”拟合模型。首先，将计算所得的建筑总碳排放量作为目标值代入模型，求解抵消该排放量所需的DBH增量；其次，结合树木生长速率方程(胸径-时间模型)，反推实现碳中和所需的时间；最后，基于Python环境(Pandas, Scipy, Matplotlib等库)集成上述数据处理与计算流程，开发碳中和时间预测软件，实现从工程清单导入到结果可视化的自动化分析。

2 结果

2.1 描述性统计

本文将研究场地内所有植株的参数进行了调整^①。根据国内景观项目中的种植施工经验，苗木清单中的植被在适宜的种植下成活率通常为90%，因此植被株数要去掉未成活的10%。此外，相同种类的乔木通常会采购若干种规格，为了便于计算及数据展示的可观性，将相同种类乔木的规格做了加权平均处理，即同一种树

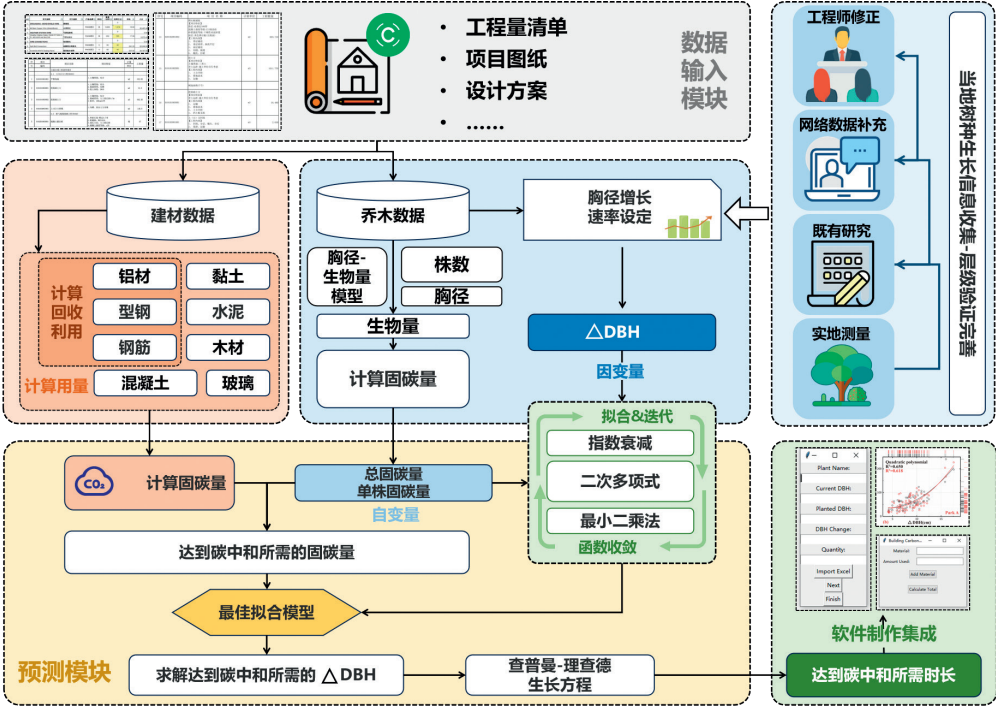


图1 碳中和预测模型工作原理

仅有1组参数。

此外，虽然2个研究场地皆为虚拟场地，但在实际项目中，场地可能存在部分自然生长的原生植被，这种情况下将难以统计每棵树的树种与规格。但中国的景观方案中，皆以“乡土树种优先”作为苗木选择的依据。因此，在树种设定中，皆选用虚拟公园所属区域的乡土树种，并默认场地中原有树种与后期栽植树种一致，从而换算出场地中各树种的推测株数。

本文将树木的碳储量贡献设定为公园建设时起，在此之前植被从幼苗到被采购前的碳储量将不计入碳储量计算中。由于公园内的建筑材料碳排放源于公园被建设，故树木的固碳行为也应根据场所不同而做出区分。本文中树木生长量决定了树木用于抵消建筑碳排放的固碳量，而衡量生长量概念的变量正是树木胸径的变化量(ΔDBH)。如表2所示，ΔDBH能够反映出公园A和公园B中植被生长量的差异，而通过这种差异可以反推植被生长所需的时长。因此，ΔDBH将作为下文中用于预测公园达到碳中和时间点的因变量。

2.2 场地碳汇与碳排放现状

经数据标准化处理后(表2、3)，公园A(华东)和公园B(华南)的乔木固碳量分别为2 371.65和2 156.29 t。尽管公园A建成更早，但由于植

表1 生产每吨建材所产生的碳排放量

建材	碳排放量/t
水泥	0.9
钢材(钢筋、型钢)	2.0
铝材	9.5
玻璃	1.4
木材	0.2
黏土	0.2
混凝土	0.1

被密度较低且高株数树种较少，其固碳总量与公园B差异不大。在建筑碳排放方面，公园A和公园B分别为6 485.64和6 198.42 t。公园A因含有较多金属与玻璃构筑物，碳排放略高。对比现状数据可知，2个公园当前的固碳量仅抵消了约35%的建筑碳排放，均未实现碳中和。

2.3 场地碳中和计算与预测建模

若仅按当前年均固碳速率(线性推算)，公园A和公园B理论上将分别于2032年4月和2030年5月实现碳中和。然而，考虑到乔木生长速率随树龄增加呈非线性递减趋势，线性推算存在较大误差^[47]。因此，实际实现碳中和的时间节点要远于理论推测时间点。

本研究引入查普曼-理查德(Chapman-Richards)生长方程，以ΔDBH为自变量建立拟

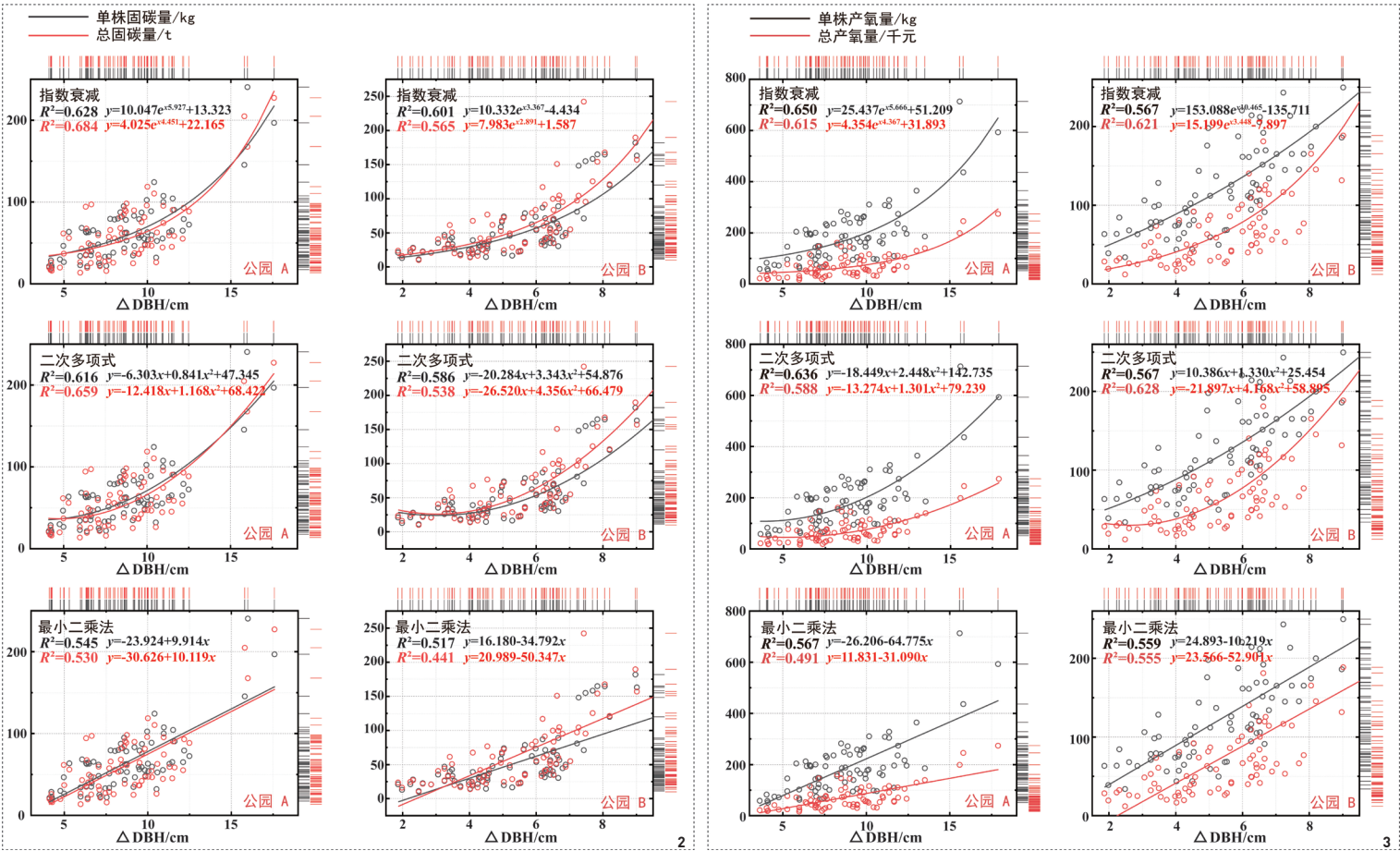


图2 公园A与公园B的碳中和预测模型效果
图3 公园A与公园B的经济价值预测模型效果

合模型(图2)。结果显示：公园A需每株乔木胸径再增长9.8 cm，预计于2038年10月(约15年后)实现碳中和；公园B需每株增长8.9 cm，预计于2035年4月实现碳中和。非线性模型预测的时间节点较线性推算分别推迟了6.5和5年，更符合植物生长规律。

$$DBH = 39.9(1 - e^{-0.0637t})^{3.06} \quad (8)$$

式中： t 为时间(年)。

2.4 场地经济价值计算与预测建模

公园A和公园B的建设总成本(苗木+建材)分别为1 584.29万和2 026.36万元。基于造林成本法与工业制氧标准测算，2个公园当前的生态经济效益(固碳+释氧)分别为346.26万和314.81万元，远未覆盖建设成本。利用同类似合模型预测生态效益与建设成本的平衡点(图3)：公园A在每株胸径增长10.7 cm时(预计2031年12月)实现损益平衡；公园B在每株增长11.2 cm时(预计2032年1月)实现平衡。结果表明，得益于产氧的高经济价值，生态效益平衡点的到来早于碳中和时间点。

表2 公园A与公园B的植被参数与固碳计算结果

	平均数	标准差	最小值	25%	中位数	75%	最大值	总计
公园A								
$\Delta DBH/cm$	8.69	2.69	3.61	6.95	8.69	10.07	17.88	—
株数/棵	302.00	232.68	52.00	168.00	339.00	485.00	798.00	23 528.00
固碳总量/t	31.48	21.39	7.68	15.90	25.41	38.48	118.42	2 371.65
产氧总量/t	93.43	63.52	22.71	52.71	82.43	122.43	345.25	7 114.97
公园B								
$\Delta DBH/cm$	5.37	1.68	1.36	4.09	5.58	6.54	9.01	—
株数/棵	477.00	232.63	136.00	370.00	421.00	655.00	877.00	37 205.00
固碳总量/t	27.95	16.20	5.06	14.13	25.99	38.48	98.21	2 156.29
产氧总量/t	83.85	48.6	15.18	42.39	77.97	115.44	294.63	6 468.86

表3 模拟场地中建筑建材与体量参数

	公园A		公园B	
建材	使用量/t	碳排放量/t	使用量/t	碳排放量/t
型钢	464.20	816.99	335.54	590.54
钢筋	387.04	606.88	695.37	1 090.35
铝材	348.34	3 131.99	274.53	2 468.35
木材	50.25	10.05	153.61	30.72
水泥	1 315.95	1 184.35	1 037.11	933.40
玻璃	193.52	270.93	152.52	213.52
黏土	619.27	123.85	1 952.21	390.44
混凝土	3 405.99	340.60	4 810.97	481.10
建筑总面积/m ²	17 319.45		12 643.15	

3 讨论

3.1 预测模型工作流程建立与应用

本研究立足于公园建设中利用乔木碳汇来抵消建材碳排放，从而达到碳中和的理念，提出了预测公园碳中和时间节点的模型(图4)。依据实地测量、华东与华南的相关研究及项目清单，模拟出不同区域下乡土树种的生长参数，通过胸径-生物量模型展开计算。模型并没有依靠固碳速率来进行预测，而是选择用树木仍需增加的DBH来反推生长时间，因为固碳速率本身会因树龄的变化而产生衰减。结果表明，固碳速率方法确实会将碳中和时间节点提前，在2个公园的预测工作中，其与预测模型的结果分别相差6年零6个月与4年零11个月，误差程度分别为56.7%和57.7%。

该模型的应用意义在于，相较传统的生物量-碳核算 workflow，大量的田野调研和在地实验与工程评价需求的衔接困难，本研究的预测模型从原数据、计算方法及预测结果的可理解性更加适应实际工程项目的模式。例如，所需数据仅来源于项目工程量清单或采购清单，即可在施工或设计方案定稿前提前预测该项目的碳中和时间。此外，该模型的计算方法相对便捷，所需参数仅为胸径变化量，而预测流程可反复迭代循环，能够满足设计方案反复调试及预测的需求。决策者可根据预测出的时间节点来调整场地建筑体量、建材选用，以及植被种类、规格等，从而使场地在更短的时间内实现碳中和。

软件的操作分为4个步骤(图5)。1)双击“carbon.exe”，显示软件初始界面，此时应将苗木清单整理为Excel表格并导入。2)弹出如步骤二中显示的窗口，需逐次输入建材后点击“Add Material”。3)添加了所有建材后点击“Calculate Total”计算总碳排放量，并关闭窗口。随后，将以matplotlib工具为用户展示3种数学模型的拟合效果。4)关闭步骤三的窗口后，会弹出步骤四的窗口，为用户展示预计达到碳中和的剩余时间。需要获取的公园数据分为建设前与建设后：建设前数据包含苗木清单中的乔木种名、胸径(辅以树龄、单价等信息)，工程量清单中的建材种类与使用量；建设后数据仅需要对应乔木的现状胸径。

该计算模型具备可拓展性(图6)。本文所定义的碳中和系统边界为乔木与建筑物，但完整的

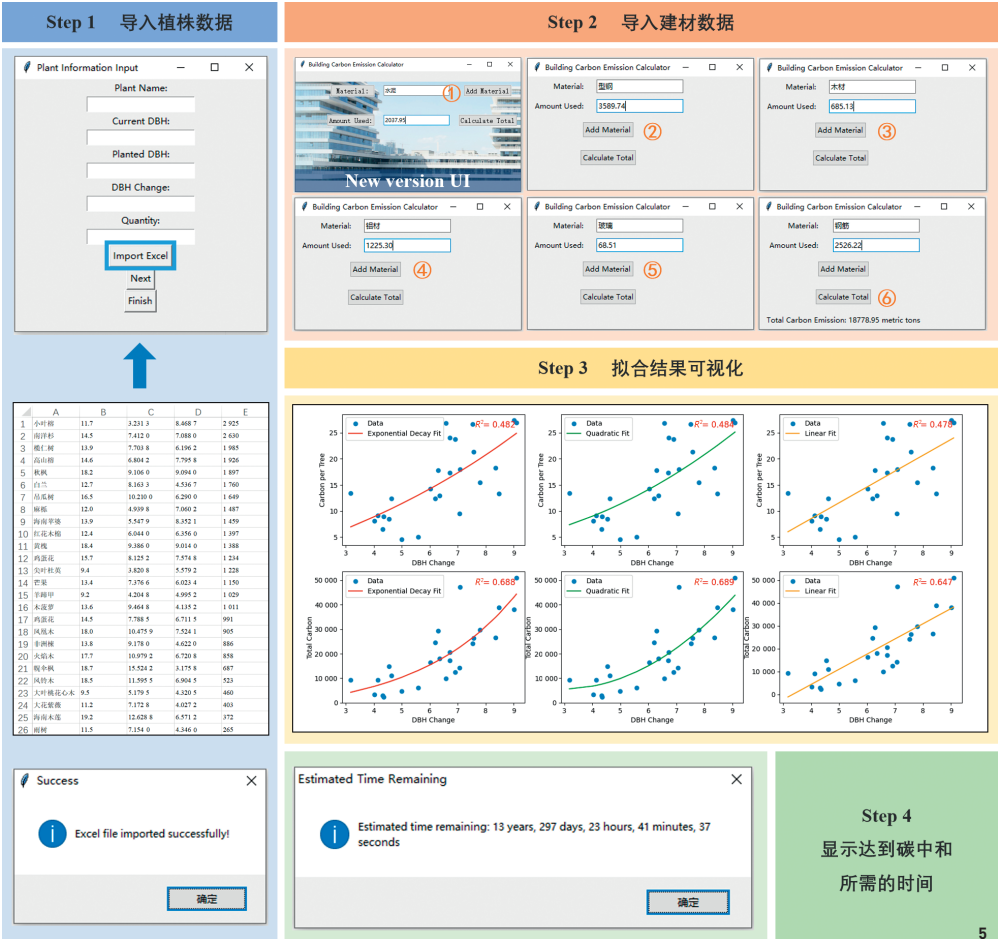
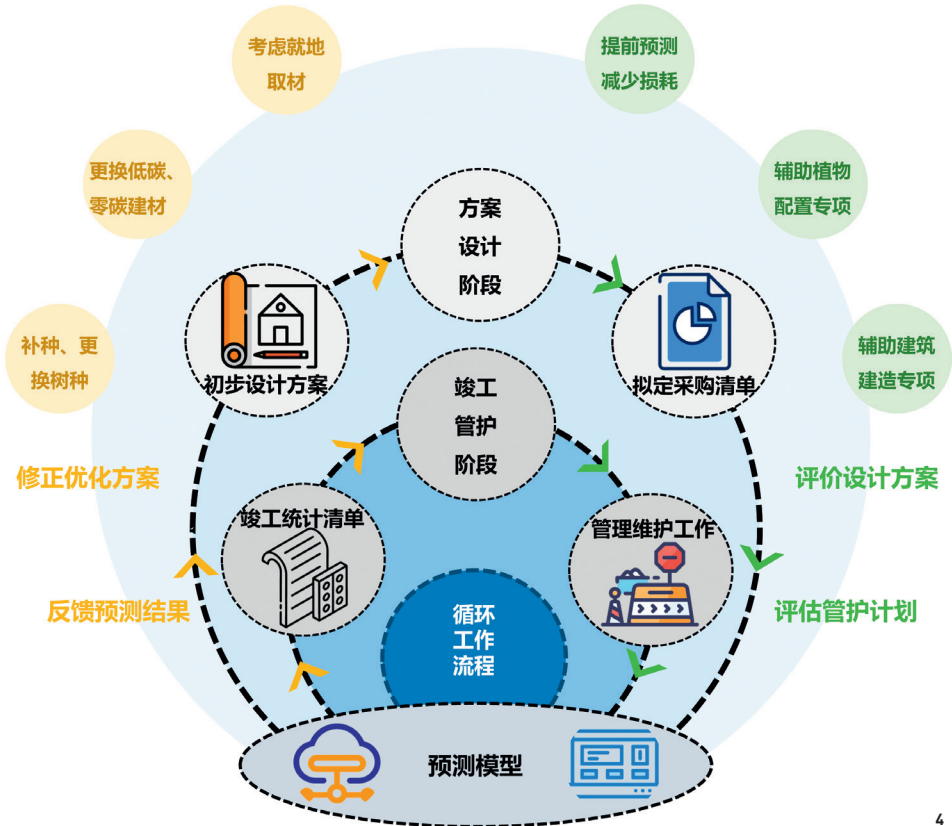


图4 预测模型工作流程与应用路径
图5 软件界面和操作步骤

碳中和体系中还包公园建设阶段碳排放,分为施工机械与建材运输两部分。可从项目资料中获取施工机械的台班及能耗数据,从而计算施工碳排放^[48];联合工程量清单中的建材种类与供货厂商的地理位置计算运输碳排放^[49]。同样,由于这2项碳排放的计算同建材碳排放一样,都源于项目资料,因此能够与原有模型衔接,在不增加数据负担的情况下完善碳中和计算体系。

3.2 降低碳中和达成时长的公园建设启示

研究显示,不同的树木在相等的生长时间内,其 ΔDBH 差异较大。因此,仅从固碳效益讲,生长速度更快、能够生长到更高体量规格的树苗、幼龄树更应被选作主要树种,提高其种植量。常绿树种通常具备更高的 ΔDBH ,因此拥有更高的生物量增量与固碳收益^[27]。但需要将种植密度和树种控制在合理范围内,过度密植会导致更多低矮树种死亡,而过多种植常绿乔木会降低公园景观多样性。

植被的碳汇能力十分有限,单纯依靠植被很难达到碳中和^[9],因此建筑物也应被考虑在碳减排的范围之内。根据建材碳排放标准和本文建模时收集的项目工程量清单,同等重量下金属的碳排放量最高,而所有建材中混凝土砌块与水泥的用量最高。根据模型预测结果来看,虽然设定在2个公园内的建筑体量、用地占比都较小,但由于其使用了大量的混凝土、水泥和金属,其碳中和的周期十分漫长。如果在实际项目中,需要建造功能更丰富、体量更大的建筑,达成碳中和的时长将呈指数级增长。因此,在未来的景观建筑建设中,应减少上述建材的用量。

改变建材类型可能会更加适宜公园的低碳建设。公园绿地在营建之前,通常为未人工干预过的林草地,内部存在相当丰富的自然资源。应提倡就地取材,大幅利用场地原有的石材、木材等天然材料建造建筑物,这样既能减少金属、混凝土的使用,又能节省运输这类建材所产生的交通碳排放^[50]。

不同的建筑风格、建造需求等都会限制建材用量的下限,合理优化建筑结构材料比例、研发新型环保建材同样具备减少碳排放的可能性。正交胶合木(Cross Laminated Timber, CLT)和钢木结构的碳中和潜力得到了广泛关注^[51],每生产1 m³的CLT,仅排放110 kg的CO₂,同等重量下其生产碳排放仅为钢材的1/20。如果按照不

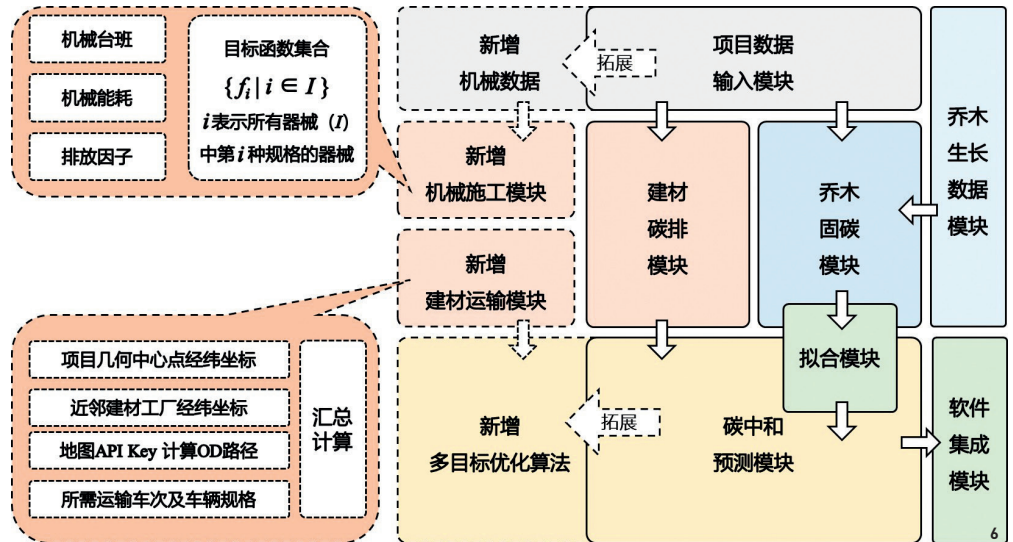


图6 可拓展性模型原理

图7 公园A(7-1)和公园B(7-2)使用CLT替换原有建材后的碳中和时长变化

同建筑材料的全球变暖潜值数值考虑,未来建筑建造中全混凝土及全钢结构或将逐渐淘汰。依据公园绿地中景观建筑的特性,提倡优先设计全木结构、钢木结构的建筑,从而在建筑结构材料方面实现碳减排。

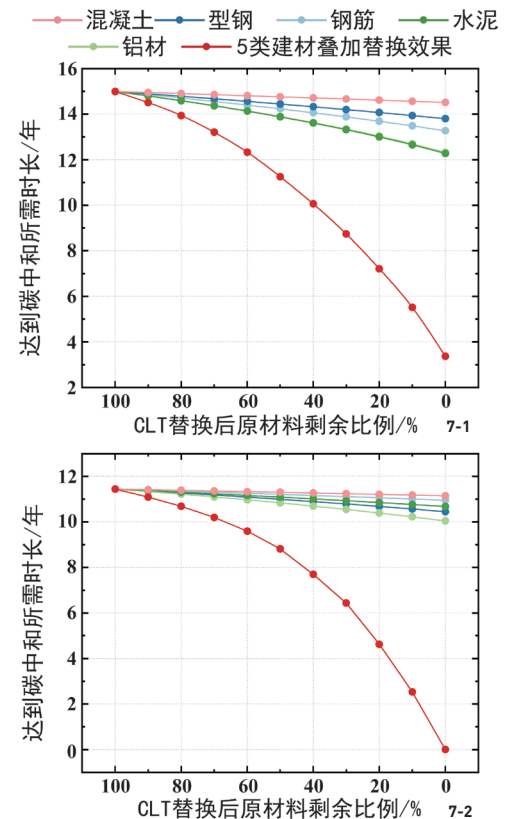
3.3 从建筑层面实施减碳措施对实现碳中和的增益

根据上述内容,可将公园A和公园B的部分建筑替换为就地取材的石木结构建筑或使用CLT材料的低碳建筑。以CLT等体积替换金属、水泥和混凝土为例,计算其不同替换比例下达成碳中和所需的时长,乔木配置保持原有设定。

图7为2个公园中使用CLT在不同比例下替换建材后达成碳中和所需的时长。单独替换某一种建材对碳中和的提速效果甚微,但当同时替换每类建材后,其碳中和时长的下降速率将越来越大。甚至在公园B中,完全替换5类建材后,乔木当前固碳量已经超过建材碳排放量,达到了碳中和。零碳建筑的系统边界中,CLT在生产前作为乔木生长时的固碳量也被纳入建筑项目的减碳部分。本文仅计算了生产加工CLT的碳排放量,但其减碳效果依然可观。

3.4 不足与展望

从植被因素来看,本研究仅考虑了公园中乔木对固碳效益的影响,根据Kong等的研究^[52],灌木与草坪同样具备固碳能力。虽然与乔木相比,该收益较少,但纳入该因素的考虑可使本研究的预测模型拥有更加契合景观方案设计的能力。当然,如何简化灌木、草坪的碳汇能力计算是当前的难点。从建模角度来看,精确测量每棵



树的工作难以实现,所有的DBH仅能取均值计算,这意味着默认了每棵树生长状况一致。从应用角度来看,本文没有考虑气候变化,诸如在当今全球气候变暖的背景下,温度和阳光对乔木固碳能力的影响是否会干涉碳中和的进程等^[5],依然值得进一步研究。

土壤作为公园绿地的重要组成部分,其有机碳汇的核算需得到重视^[53]。但当前核算土壤有机碳汇的方法中,涉及实地取样、长期观

测等需求，难以通过某种快速预测的方法与本文的模型体系衔接，因而亟须开发一种足够便捷的预测模型。同样，树木光合作用的固碳作用、建筑使用期间，以及建材、树木的运输所产生的碳排放都被证实对碳中和产生影响^[50]，但目前仍缺乏将这些因素综合考虑的预测模型。因此，上述因素将被纳入今后预测模型的建立中，从而获得更加符合实际情况的预测结果，提升预测模型的普适性。

4 结束语

本研究提供了一种通过乔木碳汇抵消建筑碳排放来预测碳中和时间节点的模型，该模型并不直接预测时间，而是通过预测树木的ΔDBH来反推所需时长，并通过2个虚拟公园展示了模型的预测原理与操作过程。研究显示，提出的预测模型计算出的碳中和时间节点比使用固碳速率计算出的结果更久，而固碳和产氧产生的经济价值也要十余年后才能抵消建筑建设费用。以上结论表明，仅凭借植被的碳汇效益来实现碳中和需要非常长的时间，而减少金属、混凝土在建筑物中的使用，以及提倡就地取材、使用CLT等零碳建材将能有效缓解植被的碳汇压力。同时，本文强调了模型在公园项目碳中和评估时的应用潜力。该预测模型能够基于项目工程量清单直接计算达到碳中和所需时长，更加便捷且契合市场与企业的低成本需求。

注：文中图片均由作者绘制。

注释：

① 关于公园A和公园B的基本情况、乔木和建筑参数，详见：<https://pan.baidu.com/s/1pnZQl93m4VLs5f5sGoLJVw?pwd=sq8h>。

参考文献：

[1] FANG K, ZHANG Q, SONG J, et al. How can national ETS affect carbon emissions and abatement costs? Evidence from the dual goals proposed by China's NDCs[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 171: 105638.

[2] HUANG R, ZHANG S, WANG P. Key areas and pathways for carbon emissions reduction in Beijing for the "Dual Carbon" targets[J]. Energy Policy, 2022, 164: 112873.

[3] RAHAMAN Z A, KAFY A A, SAHA M, et al. Assessing the impacts of vegetation cover loss on surface temperature, urban heat island and carbon emission in Penang city, Malaysia[J]. Building and Environment, 2022, 222: 109335.

[4] OTHMAN R. The influence of urban park green spaces, plant material specifications and spatial design organization and pattern towards carbon sequestration rate[J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2019, 17(4): 8079-8088.

[5] ZHAO L, DU M, DU W, et al. Evaluation of the Carbon Sink Capacity of the Proposed Kunlun Mountain National Park[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(16): 9887.

[6] ALKAMA R, FORZIERI G, DUVEILLER G, et al. Vegetation-based climate mitigation in a warmer and greener World[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 606.

[7] 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(5): 12-16.

[8] ZHANG G L, ZHONG Q C, ZHANG L. Research on carbon sequestration capacity construction of urban landscape greening oriented towards carbon neutrality[J]. Landscape Architecture, 2022, 29(5): 12-16.

[9] WANG V, GAO J. Estimation of carbon stock in urban parks: Biophysical parameters, thresholds, reliability, and sampling load by plant type[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2020, 55: 126852.

[10] VELASCO E, ROTH M, NORFORD L, et al. Does urban vegetation enhance carbon sequestration?[J]. Landscape and Urban Planning, 2016, 148: 99-107.

[11] WEISSERT L F, SALMOND J A, SCHWENDENMANN L. A review of the current progress in quantifying the potential of urban forests to mitigate urban CO₂ emissions[J]. Urban Climate, 2014, 8: 100-125.

[12] RIIKONEN A, PUMPANEN J, MÄKI M, et al. High carbon losses from established growing sites delay the carbon sequestration benefits of street tree plantings: A case study in Helsinki, Finland[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2017, 26: 85-94.

[13] SHODA T, IMANISHI J, SHIBATA S. Growth characteristics and growth equations of the diameter at breast height using tree ring measurements of street trees in Kyoto City, Japan[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2020, 49: 126627.

[14] ZHAO M, KONG Z, ESCOBEDO F J, et al. Impacts of urban forests on offsetting carbon emissions from industrial energy use in Hangzhou, China[J]. Journal of Environmental Management, 2010, 91(4): 807-813.

[15] LUKASZKIEWICZ J, KOSMALA M. Determining the Age of Streetside Trees with Diameter at Breast Height-based Multifactorial Model[J]. Arboriculture & Urban Forestry, 2008, 34(3): 137-143.

[16] PARK H M, JO H K. Ecological Design and Construction Strategies through Life Cycle Assessment of Carbon Budget for Urban Parks

in Korea[J]. Forests, 2021, 12(10): 1399.

[17] 施健健, 蔡建国, 刘朋朋, 等.杭州花港观鱼公园森林固碳效益评估[J].浙江农林大学学报, 2018, 35(5): 829-835.

[18] SHI J J, CAI J G, LIU P P, et al. Assessment of forest carbon sequestration benefit in Huagangguanyu Park, Hangzhou[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2018, 35(5): 829-835.

[19] ZHANG D, WANG W, ZHENG H, et al. Effects of urbanization intensity on forest structural-taxonomic attributes, landscape patterns, and their associations in Changchun, Northeast China: Implications for urban green infrastructure planning[J]. Ecological Indicators, 2017, 80: 286-296.

[20] DANG A T N, NANDY S, SRINET R, et al. Forest aboveground biomass estimation using machine learning regression algorithm in Yok Don National Park, Vietnam[J]. Ecological Informatics, 2019, 50: 24-32.

[21] MCGOVERN M, PASHER J. Canadian urban tree canopy cover and carbon sequestration status and change 1990-2012[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2016, 20: 227-232.

[22] 杨鑫, 高雯雯, 李莎, 等.基于遥感影像估算的北京中心城区碳储量与气候环境关联性研究[J].风景园林, 2022, 29(5): 31-37.

[23] YANG X, GAO W W, LI S, et al. Study on the correlation between carbon storage estimated by remote sensing imagery and climate environment in central Beijing[J]. Landscape Architecture, 2022, 29(5): 31-37.

[24] 刘勤, 王玉宽, 徐佩, 等.成都平原林盘的固碳特征及其效益估算: 以郫县为例[J].西南农业学报, 2018, 31(8): 1732-1738.

[25] LIU Q, WANG Y K, XU P, et al. Carbon sequestration characteristics and benefit estimation of lin pan forests in Chengdu Plain: a case study of Pi County[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2018, 31(8): 1732-1738.

[26] REN Z, ZHENG H, HE X, et al. Changes in spatio-temporal patterns of urban forest and its above-ground carbon storage: Implication for urban CO₂ emissions mitigation under China's rapid urban expansion and greening[J]. Environment International, 2019, 129: 438-450.

[27] NOWAK D J, CRANE D E, STEVENS J C, et al. A ground-based method of assessing urban forest structure and ecosystem services[J]. Arboriculture and Urban Forestry, 2008, 34(6): 347-358.

[28] MCPHERSON E G, PEPER P J. Urban tree growth modeling[J]. Arboriculture & Urban Forestry, 2012, 38(5): 172-180.

[29] AGUARON E, MCPHERSON E G. Comparison of methods for estimating carbon dioxide storage by Sacramento's urban forest[M]//LAL R, AUGUSTIN B. Carbon sequestration in urban ecosystems. Dordrecht: Springer Netherlands, 2012: 43-71.

[30] JIA X, HAN H, FENG Y, et al. Scale-dependent and driving relationships between spatial features and carbon storage and sequestration in an

[27]

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.

[28]

DORENDORF J, ESCHENBACH A, SCHMIDT K, et al. Both tree and soil carbon need to be quantified for carbon assessments of cities[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2015, 14(3): 447-455.

[29]

陈颖. 上海典型城市绿地植物群落的20年动态变化研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2022.
CHEN Y. A 20-year dynamic change study on typical urban green space plant communities in Shanghai[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2022.

[30]

张颖. 广州典型城市绿地碳足迹核算和评估研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
ZHANG Y. Carbon footprint accounting and assessment study of typical urban green spaces in Guangzhou[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014.

[31]

陈瑞波, 朱宁宁, 梅树红, 等. 广西桉树和马尾松单木胸径/冠幅-树高模型构建[J]. 测绘与空间地理信息, 2022, 45(7): 70-73.
CHEN R B, ZHU N N, MEI S H, et al. Individual Diameter-height and Crown-height Prediction Models for *Pinus Massoniana* and *Eucalyptus* in Guangxi[J]. Geomatics and Spatial Information Technology, 2022, 45(7): 70-73.

[32]

黄观赞, 盖晴晴, 何碧胜, 等. 2017—2022年广东江门古兜山保护区森林碳密度变化分析[J]. 南方农业, 2023, 17(12): 63-66.
HUANG G Y, GAI Q Q, HE B S, et al. Analysis of forest carbon density changes in Gutou Mountain Protection Area, Jiangmen, Guangdong, from 2017 to 2022[J]. Southern Agriculture, 2023, 17(12): 63-66.

[33]

黄成威, 齐磊, 多杰才仁, 等. 基于级联循环网络的林木生长参数预测[J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(8): 94-108.
HUANG C W, QI L, DUOJIE C R, et al. Prediction of forest tree growth parameters based on cascade circulation network[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(8): 94-108.

[34]

QING D, LI J, DENG Q, et al. Mining and quantifying the optimal DBH range of loblolly pine with improved particle algorithm[J]. Neural Network World, 2022, 32(2): 113-130.

[35]

PONDER F. Fertilizer combinations benefit diameter growth of plantation black walnut[J]. Journal of Plant Nutrition, 1998, 21(7): 1329-1337.

[36]

ULVCRONA K A, KARLSSON K, ULVCRONA T. Identifying the biological effects of pre-commercial thinning on diameter growth in young Scots pine stands[J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2014, 29(5): 427-435.

[37]

KANG J, KO C, SUN-JEOUNG L, et al. Relationship of H/D and crown ratio and tree growth for *Chamaecyparis obtusa* and *Cryptomeria japonica* in Korea[J]. Forest Science and Technology, 2021, 17(3): 101-109.

[38]

刘丽颖, 张绍轩, 任佳佳, 等. 30年生不同生长势杉木的胸径和树高的生长动态[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(6): 171-175.
LIU L Y, ZHANG S X, REN J J, et al. Growth dynamics of diameter at breast height and tree height in 30-year-old Chinese fir with different growth vigor[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(6): 171-175.

[39]

高东启, 邓华锋, 程志楚, 等. 基于度量误差模型方法建立的林分相容性树高曲线方程组[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(5): 65-70.
GAO D Q, DENG H F, CHENG Z C, et al. Compatible tree height curve equation system for forest stands established based on measurement error model method[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2015, 43(5): 65-70.

[40]

刘平, 马履一, 王玉涛, 等. 油松中幼人工林单木胸径生长模型研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2009, 40(2): 197-201.
LIU P, MA L Y, WANG Y T, et al. Study on single-tree diameter at breast height growth model of young and middle-aged *Pinus tabulaeformis* plantations[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2009, 40(2): 197-201.

[41]

孙戴妍, 尚旭岚, 沈香香, 等. 青钱柳胸径生长和木材密度的地理变异规律[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, 41(4): 1-5.
SUN D Y, SHANG X L, FU X X, et al. Geographic variation patterns of diameter at breast height growth and wood density in *Cercidiphyllum japonicum*[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2017, 41(4): 1-5.

[42]

何静, 朱光玉, 张学余, 等. 基于立地与密度效应的湖南栎类天然林平均木胸径生长模型[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(10): 75-82.
HE J, ZHU G Y, ZHANG X Y, et al. Average tree diameter at breast height growth model of natural oak forests in Hunan based on site and density effects[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2021, 41(10): 75-82.

[43]

刘琪璟. 嵌套式回归建立树木生物量模型[J]. 植物生态学报, 2009, 33(2): 331-337.
LIU Q J. Establishment of tree biomass models using nested regression[J]. Journal of Plant Ecology, 2009, 33(2): 331-337.

[44]

JO H K. Impacts of urban greenspace on offsetting carbon emissions for middle Korea[J]. Journal of Environmental Management, 2002, 64(2): 115-126.

[45]

JO H K, MCPHERSON G E. Carbon Storage and Flux in Urban Residential Greenspace[J]. Journal of Environmental Management, 1995, 45(2): 109-133.

[46]

赵平, 同继锋, 马誉荣. 建筑材料环境负荷指标及评价体系的研究[J]. 中国建材科技, 2004(6): 1-7.
ZHAO P, TONG J F, MA J R. Research on environmental load indicators and evaluation system of building materials[J]. China Building Materials Science and Technology, 2004(6): 1-7.

[47]

王剑武, 徐森, 季碧勇, 等. 地形和林分空间结构对浙江省天然阔叶混交林主要先锋树种胸径生长的影响[J]. 应用生态学报, 2024, 35(2): 298-306.
WANG J W, XU S, JI B Y, et al. Effects of

[48]

钱思祺, 秦安华, 蔺阿琳. 园林工程建设阶段碳排放量化及减碳策略研究: 以北塘河公园为例[J]. 建设科技, 2022(20): 47-50.
QIAN S Q, QIN A H, LIN A L. Quantification and carbon reduction strategies of carbon emissions during landscape engineering construction phase: a case study of Beitang River Park[J]. Construction Science and Technology, 2022(20): 47-50.

[49]

张琳瞳, 唐红, 杨崇鉴, 等. 基于全生命周期的兰州微公园碳平衡探究[J]. 建筑科学, 2024, 40(6): 218-225.
ZHANG L T, TANG H, YANG C J, et al. Investigation of carbon balance in Lanzhou micro-parks based on full life cycle[J]. Architectural Science, 2024, 40(6): 218-225.

[50]

SARKAR B, GANGULY B, SARKAR M, et al. Effect of variable transportation and carbon emission in a three-echelon supply chain model[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2016, 91: 112-128.

[51]

YOUNIS A, DODOO A. Cross-laminated timber for building construction: A life-cycle-assessment overview[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 52: 104482.

[52]

KONG L, SHI Z, CHU L M. Carbon emission and sequestration of urban turfgrass systems in Hong Kong[J]. Science of the Total Environment, 2014, 473/474: 132-138.

[53]

蔡亚楠, 鞠正山, 黄勤, 等. 土壤有机碳汇内涵与核算方法辨析[J]. 生态学报, 2024, 44(2): 602-611.
CAI Y N, JU Z S, HUANG Q, et al. Analysis of the connotation and accounting methods of soil organic carbon sinks[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(2): 602-611.

(编辑/马琳)

作者简介:

袁 红
1982年生/女/重庆人/博士/西南交通大学建筑学院教授, 博士生导师/研究方向为智慧城市、低碳城市(成都 611756)

刘子奕
1996年生/男/山东安丘人/西南交通大学建筑学院在读博士研究生/研究方向为数字景观、计算性城市设计(成都 611756)

周亦璟
2002年生/女/湖南常德人/西南交通大学建筑学院在读硕士研究生/研究方向为城市设计(成都 611756)

秦浩喆
2002年生/男/陕西渭南人/西南交通大学城市轨道交通学院本科生/研究方向为智能建造(成都 611756)

邵继中
1979年生/男/江苏南京人/博士/华中农业大学园艺林学学院教授, 博士生导师/研究方向为风景园林气候积极性设计理论及方法、数字城市设计/本刊特约编辑(武汉 430070)

Study on Carbon Neutrality Effect of Park Green Space Construction: Carbon Neutrality Prediction Model and Application Simulation Based on Trees and Buildings

YUAN Hong, LIU Ziyi, ZHOU Yijing, QIN Haozhe, SHAO Jizhong*

Abstract: Under the "dual carbon" goals, urban parks, as important green infrastructure, play an increasingly prominent role in addressing climate change through their carbon sequestration functions. Research has shown that plants in green spaces can absorb a portion of carbon emissions in urban areas, achieving carbon neutrality when the carbon sequestration capacity of plants offsets the carbon emissions. However, the timing of when park green spaces can achieve carbon neutrality has been rarely studied, and existing research faces limitations in guiding engineering practices. Despite numerous scholars calculating annual carbon sequestration rates, the growth rate of trees is not linearly increasing, and current studies often overlook the massive embedded carbon emissions from park buildings despite their small footprint, leading to incomplete assessments. This study aims to develop a carbon neutrality timing prediction model based on the bill of quantities. To ensure the model's applicability across different climate zones, we collected engineering quantity lists and design drawings from 20 park projects in eastern and southern China, extracting seedling specifications, quantities, and building material data. We calculated the carbon sequestration increment of each tree within a specified period based on the diameter at breast height (DBH) - biomass allometric growth equation, and established a fitting equation with the increment of DBH (Δ DBH). The model utilizes the Chapman-Richards growth equation to simulate the non-linear growth process of trees, accounting for the fact that tree growth rates decrease with age rather than maintaining linear progression. Subsequently, by setting the carbon emissions from buildings in the park as the target, we used the fitting equation to solve for the remaining Δ DBH and infer the duration of tree growth required to achieve carbon neutrality, thereby predicting the timing of carbon neutrality. The specifications of trees and buildings in two virtual parks (A and B) are based on project data from parks in eastern and southern China and are applied in the validation of the prediction model. After data standardization, Parks A and B showed carbon sequestration capacities

of 2,371.65 and 2,156.29 t, respectively, while their building carbon emissions reached 6,485.64 and 6,198.42 t, respectively. Current carbon sequestration only offsets approximately 35% of building carbon emissions in both parks. The results indicate that the predicted dates for both parks to achieve carbon neutrality (October 2038 and April 2035) are significantly later than the dates predicted directly based on linear carbon sequestration rates (April 2032 and May 2030), with error margins of 56.7% and 57.7%, respectively. Park A requires an additional 9.8 cm DBH growth per tree, while Park B needs 8.9 cm growth per tree. Economic analysis revealed that the total construction costs (seedlings + building materials) were 15.84 million and 20.26 million yuan for Parks A and B, respectively, with current ecological economic benefits of 3.46 million and 3.15 million yuan, indicating that ecological benefit balance points would be reached earlier than carbon neutrality timing. The study integrated the data processing and calculation workflow into a Python-based software tool, enabling automated analysis from engineering list import to result visualization. This paper emphasizes that achieving carbon neutrality solely through tree carbon sinks requires an extremely long time period, and the carbon neutrality duration can be significantly shortened by using local materials and zero-carbon building materials such as Cross Laminated Timber (CLT). When different proportions of conventional building materials are replaced with CLT, the carbon neutrality timeline can be substantially reduced, with complete replacement potentially achieving immediate carbon neutrality. This research provides a carbon neutrality prediction model and methodology for urban park development, which can be directly calculated based on the bill of quantities, significantly reducing workload and offering practical guidance for optimizing solutions for enterprises and decision-makers in low-carbon oriented park design and management.

Keywords: landscape architecture; biomass; building material; carbon sequestration; diameter at breast height; fitting model

Biography

YUAN Hong, female, born in 1982 in Chongqing, Ph.D., Professor and Doctoral Supervisor at the School of Architecture, Southwest Jiaotong University, research area: smart city, low-carbon city (Chengdu 611756)

LIU Ziyi, male, born in 1996 in Anqiu, Shandong Province, Ph.D. candidate at the School of Architecture, Southwest Jiaotong University, research area: digital landscape, computational urban design (Chengdu 611756)

ZHOU Yijing, female, born in 2002 in Changde, Hunan Province, Master's student at the School of Architecture, Southwest Jiaotong University, research area: urban design (Chengdu 611756)

QIN Haozhe, male, born in 2002 in Weinan, Shaanxi Province, Undergraduate student at the School of Urban Railway Transportation, Southwest Jiaotong University, research area: intelligent construction (Chengdu 611756)

SHAO Jizhong, male, born in 1979 in Nanjing, Jiangsu Province, Ph.D., Professor and Doctoral Supervisor at the College of Horticulture and Forestry Sciences, Huazhong Agricultural University, Special Editor of *Chinese Landscape Architecture*, research area: theory and method of climate initiative design for landscape architecture, digital urban design (Wuhan 430070)