

基于低碳理念下的居住区景观全生命周期碳平衡研究

Research on the Carbon Balance of the Whole Life Cycle of Residential Landscape Under the Concept of Low Carbon

李昱烨 唐 红

LI Yuye TANG Hong

(甘肃农业大学林学院, 兰州 730070)

(College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu, China, 730070)

文章编号: 1000-0283(2024)02-0111-08

DOI: 10. 12193 / j. laing. 2024. 02. 0111. 014

中图分类号: TU986

文献标志码: A

收稿日期: 2023-10-05

修回日期: 2023-12-20

摘 要

居住区景观是人们日常生活中最常接触到的城市绿地, 对于实现“碳中和”目标具有至关重要的作用。城市景观不仅具备植物碳汇功能, 且涵盖了景观材料的生产、建造、使用和维护周期的碳排放。以甘肃省白银市国际城小区为例, 通过实地调查研究及参考相应标准碳排放因子, 计算景观全生命周期的碳排放量, 揭示出景观材料生产阶段占总碳排放量的比重最大(47.08%), 其次是景观使用阶段(27.68%)。参考植物单位叶面积和单位叶面积固碳量, 计算居住区植物景观全生命周期碳汇量为2 530.36 t。分析碳源和碳汇的相互转化过程可得, 居住区景观在建成的第48年达到碳平衡状态。基于对居住区景观全生命周期碳平衡的分析, 提出了低碳理念下居住区景观的减排和增汇策略, 进而初步探讨低碳景观评价体系, 为可持续发展的城市景观建设提供实践参考。

关键词

居住区景观; 景观全生命周期; 碳平衡; 碳排放; 植物碳汇

Abstract

Residential landscape is the most common source of urban green space carbon sink that people come into contact with in daily life, which is of certain significance for achieving the goal of “carbon neutrality”. In addition to the carbon sink function of plants, urban landscape also includes carbon emissions during the production of landscape materials, construction, use and maintenance. This study took the residential area of Znternational City Community as an example, calculated the carbon emissions of the whole life cycle of the landscape through field investigation and reference to the corresponding standard carbon emission factors, and revealed that the landscape material production stage accounted for the largest proportion of total carbon emissions (47.08%), followed by the landscape construction stage (27.68%). Referring to plant unit leaf area and carbon sequestration per unit leaf area, the annual carbon sequestration amount of plant landscape in residential area was calculated as 2 530.36 t. By analyzing the mutual conversion process of carbon source and carbon sink, it can be concluded that the residential landscape has reached the carbon balance state in the 48th year after the construction of the residential landscape. Based on the analysis of the carbon balance of the whole life cycle of residential landscape, this paper puts forward the strategy of reducing emission and increasing sink of residential landscape under the concept of low carbon, and then discusses the evaluation system of low carbon landscape, which provides practical reference for the construction of sustainable urban landscape.

Keywords

residential landscape; the whole life cycle of landscape; carbon balance; carbon emissions; plant carbon sink

李昱烨

1998年生/女/甘肃靖远人/硕士/研究方向为风景园林规划设计

唐 红

1969年生/女/山东阳谷人/博士/副教授/研究方向为寒旱区景观规划与设计、园林观赏植物遗传育种及培育

20世纪以来, 人类生产活动造成的大气CO₂浓度升高已经带来诸多全球性危机, 国家主席习近平在第75届联合国大会发表重要讲话后, 中国陆续出台相应提议, 其中包括2035年远景目标: 广泛形成绿色生产生活

方式, 碳排放达峰后稳中有降。2023年9月, 中国生态环境部提出, 要充分发挥环境影响评价制度对温室气体的源头防控作用, 深化温室气体排放环评试点, 落实降碳减污扩绿增长协同推进要求^[1]。城市作为各种能源消

耗的主体，也是碳排放的主要载体，城市景观中的自然元素如植物、水体等，不仅能吸收空气颗粒物、降低城市热岛效应，而且能够固碳释氧，是城市中唯一净减碳的维度。在降碳与扩绿的双重需求下，构建低碳城市景观与高绩效城市绿地模式单元，实现城市景观碳平衡就成为了风景园林领域亟需探索的方向。

居住区作为人们日常最常接触到的城市景观，相较于宏观尺度的低碳城市来说，其实施性、操作性更强，已有研究发现，居住区绿地率>30%，CO₂浓度呈直线下降趋势，绿地率>40%，空气中CO₂浓度保持正常含量^[2-3]。合理的居住区景观体系即是城市中高效益城市绿地模式单元，对促进城市碳平衡具有较高潜力^[4]。本研究引入了全生命周期理念，分析居住区尺度碳排放和植物碳汇及其相互转换关系。景观全生命周期是一个全面性和长期性用于评估和管理项目环境、社会和经济影响，从规划设计阶段到建设、运营和维护阶段的系统性的方法^[5]。全生命周期最初被用于建筑部门，作为一项有效的工具和方法，用于评价建筑对环境的影响^[6]。如对建筑能源使用和污染物排放的影响进行预测分析和评估，从目的和定义、数据分析、影响评估、改进分析4个方面构建SUSBLCA全生命周期模型，对相关行业能源消耗产生的CO₂评估有一定参考价值^[7]。或者建立园林工程碳排放评估体系，评估城市公园碳排放量^[8]。目前景观全生命周期利用到“双碳”领域主要研究小尺度绿地碳平衡，提出高绩效小尺度绿地的营建方法^[4]，以及研究居住区50年生命周期的碳排放量，进而提出营建低碳景观的可行性分析^[9-10]，但从环境影响评价视角研究景观碳平衡进而具体探讨碳平衡优化策略的研究较少，因此本

研究从居住区尺度探究景观全生命周期碳平衡，提出减碳、增汇策略，从而完善低碳景观评价对温室气体排放的防控，为日后建设低碳景观提供参考。

1 研究对象及研究方法

1.1 研究区概况

研究区为甘肃省白银市靖远县国际城小区，靖远县地处甘肃省中东部，黄河上游，属黄土高原沟壑区，温带干旱半干旱气候，年均气温8.9℃左右，年均降水量240 mm。国际城小区位于靖远县新城区，北邻城市主干道，东邻县人民广场，周边交通便利。小区规划用地面积42 775 m²，景观用地面积20 759 m²，其中硬质铺装包括地上停车场、中心游园、小游园，面积共7 926.5 m²，软质景观面积为乔木、灌木、草本等，共12 832.5 m²。

1.2 研究方法

本文涉及到的居住区景观全生命周期借鉴建筑碳排放计算方法，将生命周期定义为材料生产、建造、使用、维护阶段^[4,7]4个阶段。碳排放来源是4个阶段的能源消耗和污染物排放的总和，植物碳汇由研究区内不同植物通过光合作用吸收CO₂释放O₂，从而降低了环境中的CO₂浓度，补充了环境中O₂产生，即植物固碳效益。

1.2.1 碳排放量计算

在建筑生命周期碳源分析中采用的相关行业分析方法，因此在计算景观全生命周期碳排放量时也参考该方法。如原材料生产根据建筑材料定额分析，施工、维护阶段根据使用机械在工程中的定额耗能，运输过程需根据运输车辆定额距离耗油量得出^[7]。通过调查得到场地景观建设的能源消耗量和具体

工程量，工程能源消耗与相应的碳排放因子的乘积即碳排放量，各类碳排放因子参考相应行业碳排放计算标准。4个阶段碳排放之和即全生命周期的碳排放量。计算如公式(1)，式中CCO₂代表全生命周期碳排放量，kg CO₂e；C_p为景观材料生产的碳排放量，C_b为景观建造阶段的碳排放量，C_u为景观使用阶段的碳排放量，C_m为景观维护阶段的碳排放量。

$$CCO_2 = C_p + C_b + C_u + C_m \quad (1)$$

1.2.1.1 景观材料生产阶段碳排放计算公式

原材料生产、加工、直到产品出厂并运输到施工现场，各个环节都会产生温室气体排放，《环境管理生命周期评价要求指南》(GB/T24040)为碳排放计算提供了标准和方法。计算如公式(2)，式中*M_i*为第*i*种景观材料的用量，*N_i*为第*i*种景观材料的碳排放因子，kg CO₂e。

$$C_p = \sum_{i=1}^n M_i \cdot N_i \quad (2)$$

1.2.1.2 景观建造阶段碳排放计算公式

景观建造阶段产生的碳排放量主要来自两部分，一部分是建设期间使用的机械耗油量和耗电量，另一部分是材料运输产生的车辆耗油量。建造期间所用人力无能源消耗，所以不产生碳的排放。计算如公式(3)(4)，式中C_{bl}为材料运输过程的碳排放，*D_i*为第*i*种景观材料运输距离，*T_i*为第*i*种景观材料运输能源消耗量，*E_i*为运输第*i*种景观材料车辆的碳排放因子。C_{b2}为施工建造过程的碳排放，*F_i*为第*i*种景观建造机械的单位台班耗能，*R_i*为第*i*种景观建造机械台班量，*W_i*为第*i*种景观建造机械碳排放因子。

$$C_{bl} = \sum_{i=1}^n D_i \cdot T_i \cdot E_i \quad (3)$$

$$C_{b2} = \sum_{i=1}^n F_i \cdot R_i \cdot W_i \quad (4)$$

1.2.1.3 景观使用阶段碳排放计算公式

景观使用阶段碳排放来自各类照明设备, 计算如公式(5), 中 Q_i 为第 i 种照明设备的数量, H_i 为第 i 种照明设备的年能源消耗量, J_i 为第 i 种照明设备碳排放因子, 其中消耗量为功率与年照明时长的乘积。

$$C_u=\sum_{i=1}^n Q_i \cdot H_i \cdot J_i \tag{5}$$

1.2.1.4 景观维护阶段碳排放计算公式

景观维护内容主要为植物养护、补种, 计算如公式(6), 式中 K_i 为第 i 种植物养护内容消耗能源量, O_i 为第 i 种植物养护碳排放因子。

$$C_u=\sum_{i=1}^n K_i \cdot O_i \tag{6}$$

1.2.2 碳汇量计算

植物的功能之一即固碳释氧, 通过吸收 CO_2 减弱温室效应。景观年碳汇量是各种植物固碳量的总和, 植物固碳量测算采用光合速率法, 乔灌木计算模型参考叶面积方程和单位叶面积 CO_2 吸收量, 草本碳汇因子参考国内相关研究使用光合仪测量并计算的研究成果^[11,13]。计算如公式(7)(8), 式中 Q_1 表示乔木和灌木年碳汇量, kg。 S_i 为第 i 种乔灌木单株叶面积, m^2 ; $L A_i$ 为第 i 种乔灌木单位叶面积年固碳量, $kg \cdot m^2 y^{-1}$; N_i 为研究区内第 i 种乔灌木的株数。 Q_2 表示草本年碳汇量, kg, $Y L A_i$ 为第 i 种草本年固碳量, $g CO_2 / m^2$; A_i 为研究区内草本面积, m^2 。

$$Q_1=\sum_{i=1}^n S_i \cdot L A_i \cdot N_i \tag{7}$$

$$Q_2=\sum_{i=1}^n Y L A_i \cdot A_i \tag{8}$$

2 研究结果及分析

2.1 碳排放量

2.1.1 景观材料生产阶段碳排放量

通过调研靖远县国际城小区景观使用材

料清单得到主要的材料13种和相应材料的用量, 具体材料和用量如表1所示, 根据计算公式(2)得到景观材料生产阶段的碳排总量1 169 185.73 kg。

2.1.2 景观建造阶段碳排放量

2.1.2.1 景观建设产生的碳排放

景观建设产生碳排的过程包括混凝土砂

浆搅拌、场地平整、地面压实、木材和石材的切割及加工、材料运输等, 每类机械消耗量依据《园林绿化工程消耗量定额》, 以及国际城小区景观工程量清单和机械台班记录清单, 统计得出施工机械台班耗能和台班数量, 具体统计数据如表2所示, 根据计算公式(3)得到景观建设施工产生的碳排放量为137 529.78 kg。

表1 景观材料生产阶段的碳排放量
Tab. 1 Carbon emissions in the production stage of landscape materials

材料种类 Type of material	用量 Dosage	碳排放因子 ^[14] (kgCO ₂ /单位) Carbon emission factor	年碳排放量/kg Annual carbon emission
大理石	80.00 m ³	39.89	3 191.20
C30 陶砖	170.40 t	735.00	125 244.00
花岗岩	150.00 m ³	142.48	21 372.00
混凝土砖	200.00 m ³	336.00	67 200.00
石灰	410.90 t	1 190.00	167 671.00
水泥	170.50 t	735.00	125 317.50
混凝土	50.00 m ³	295.00	1 563 500.00
沥青混凝土	645.40 t	439.00	283 330.60
钢材	13.67 t	2 365.00	32 329.55
木材	100.00 m ³	12.07	1 207.00
碎石	35.00 t	2.18	76.30
砂	158.00 t	2.51	396.58
玻璃	2.00 t	1 130.00	2 260.00

表2 景观建造机械碳排放量
Tab. 2 Carbon emissions of landscape construction machinery

机械种类 Type of machinery	耗能 Energy consumption	台班量/消耗量 Capacity of station shift/ Consumable	碳排放因子 ^[16] Carbon emission factor	年碳排放量/kg Annual carbon emission
商混搅拌车	40L柴油/台班	180台班	2.73 kgCO ₂ /L	19 656.00
挖掘机	40 L柴油/台班	200台班	2.73 kgCO ₂ /L	21 840.00
推土机	45 L柴油/台班	90台班	2.73 kgCO ₂ /L	11 056.5.00
压实机	38.6 L柴油/台班	36台班	2.73 kgCO ₂ /L	3 793.61
平地机	45 L柴油/台班	320台班	2.73 kgCO ₂ /L	39 312.00
起重机	63.5 L柴油/台班	45台班	2.73 kgCO ₂ /L	7 800.98
挖坑机	56 L柴油/台班	60台班	2.73 kgCO ₂ /L	9 172.80
切割机	0.5 L kW/h	540 h	780.2 g/(kW·h)	210.70
角磨机	1 L kW/h	1 200 h	780.2 g/(kW·h)	936.20
装载机	58 L柴油/台班	150台班	2.73 kgCO ₂ /L	23 751.00

2.1.2.2 景观运输产生的碳排放

景观运输产生的碳排量来自植物和材料运输中车辆耗油量，国际城小区均采用西北地区本土植物，由县内苗圃提供，大型乔木运输车辆为13 m长的重卡，每公里耗油量为0.4 L，小乔木、灌木、地被运输车辆为7.6 m的轻卡，每公里耗油0.34 L。景观材料运输分别来自靖远县内建材市场、临夏县、兰州市，均采用重卡运输，由表 3 可知具体景观材料运输距离与消耗量，根据计算公式（4）得出景观建设运输产生的碳排放量为17 276.20 kg。

2.1.3 景观使用阶段碳排放量

景观日常使用阶段产生的碳排放，来自各种照明设施的电量消耗，部分照明设备的使用时间有差异，如大部分高杆灯、地埋灯，冬季照明时段为18:30–23:30，夏季照明时段为19:00–24:00，少部分则是冬季18:30–次日7:30，夏季19:00–次日6:00，所以高杆灯、地埋灯每日照明时长按照7 h计算。出入口处线性灯冬18:30–次日7:30，夏为19:00–次日6:00，其余照明设备是为了满足居住区景观品质，并无特殊照明需求，使用时间段均为19:30–23:30，参考中国区域电网碳排放因子来测算碳排放量，根据计算公式（5）得出景观使用阶段碳排放量如表4所示，其中碳排放总量为13 776.89 kg。

2.1.4 景观维护阶段碳排放量

景观维护阶段碳排主要为植物的养护管理，包括补种、修剪、灌溉、施肥以及病虫害的防治。草坪修剪为5–11月，每月修剪两次，11–次年3月不修剪，灌溉方式为自来水漫灌、喷灌，灌溉频率每周一次，冬季除外。另外根据国际城小区所属嘉泽物业管理细则，植物更新、补种为5年一次，主要更

新小乔木、灌木和地被植物，所以景观维护阶段产生的碳排放量，还包括植物补种运输过程中轻卡的耗油量，其余养护管理措施根

据绿地类型和植物生长状况而定，具体维护项目如表5所示，根据计算公式（6）得出景观维护阶段碳排放总量为9 436.8 kg。

表 3 景观植物运输碳排放量
Tab. 3 Carbon emissions from landscape plant transportation

运输项目 Transportation item		运输距离/km Transport distance	运输耗油量（车/L） Transportation fuel consumption	碳排放因子 ^[16] （kgCO ₂ /L） Carbon emission factor	年碳排放量/kg Annual carbon emission
植 物	大乔木	40	15/0.40	2.73	1 310.40
	小乔、灌木、地被	40	21/0.34	2.73	1 559.38
	C30陶砖、花岗岩、混凝土砖	300	11/0.40	2.73	7 207.20
景 观 材 料	石灰	30.4	10/0.40	2.73	663.94
	水泥	30.4	22/0.40	2.73	1 460.66
	混凝土	30.4	35/0.40	2.73	2 323.78
	沥青混凝土	30.4	16/0.40	2.73	1 062.30
	碎石	30.4	2/0.40	2.73	132.79
	砂	30.4	4/0.40	2.73	265.57
	玻璃	10	1/0.34	2.73	18.56
钢材、木材		137	5/0.34	2.73	1 271.63

表4 景观使用阶段碳排放量
Tab. 4 Carbon emissions in landscape use stage

灯具种类 Luminaire type	数量 Quantity	功率/w Power	日照明时长/h Daily illumination duration	碳排放因子 ^[17] （kgCO ₂ /kw） Carbon emission factor	年碳排放量/kg Annual carbon emission
高杆灯	42盏	45	7	0.89	4 297.77
草坪灯	63盏	10	4	0.89	818.62
水底灯	20盏	8	4	0.89	207.90
射灯	30盏	60	4	0.89	2 338.92
地埋灯	46盏	10	7	0.89	1 046.02
线形灯	60 m	20	13	0.89	5 067.66

表5 景观使用阶段碳排放量
Tab. 5 Carbon emissions in landscape use stage

维护项目 Maintenance item	年消耗量 Annual consumption	碳排放因子 ^[15-17,20] （kgCO ₂ /单位） Carbon emission factor	年碳排放量/kg Annual carbon emission
植物灌溉用水	9 879.79 t	0.30	2 963.94
机械修剪（机油）	436.88 L	2.30	1 004.82
农药消耗量	557.32 kg	7.73	4 308.08
尿素	144.25 kg	3.70	533.73
碳酸一铵	526 kg	0.41	215.66
碳酸二铵	326 kg	0.21	68.46
有机肥	420 kg	0.072	30.24
植物补种	—	—	311.88

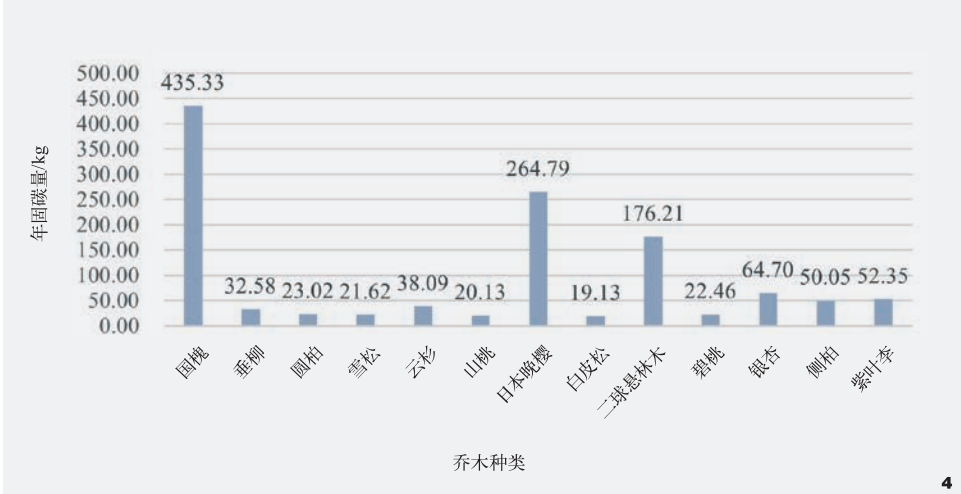
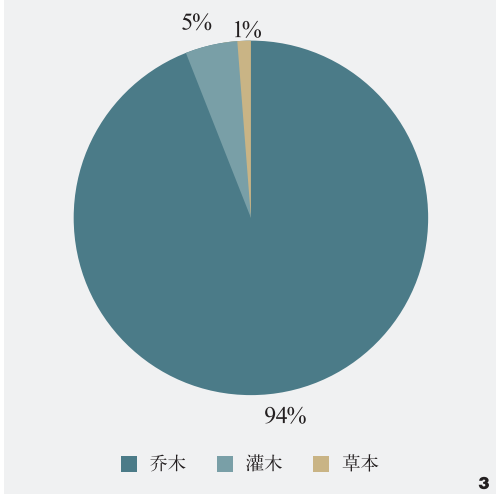
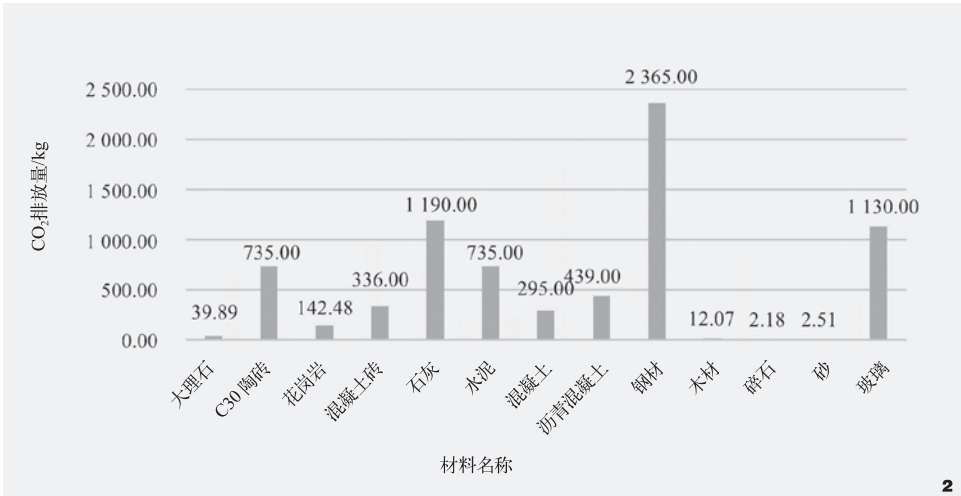
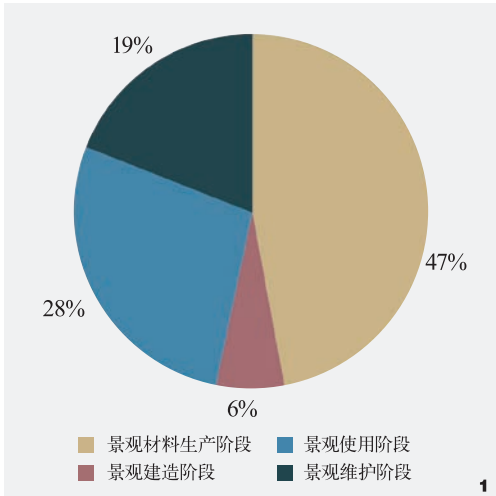


图1 国际城小区景观全生命周期碳排放量占比
Fig. 1 The proportion of carbon emissions in the whole life cycle of the landscape of the International City Community

图2 单位质量或体积景观材料生产极端产生的碳排比较
Fig. 2 Comparison of carbon emissions generated by extreme production of landscape materials per unit mass or volume

图3 国际城小区植物年固碳量占比
Fig. 3 Proportion of annual carbon sequestration by plants in International City Community

图4 国际城小区植物乔木类单株年碳汇量
Fig. 4 Annual carbon sink per plant in International City Community

2.2 全生命周期碳排放量分析

根据《建筑碳排放计算标准》规定，一般按照50年计算居住区建筑生命周期，因此本研究将居住区景观碳汇全生命周期定为50年。国际城小区景观全生命周期碳排放量占比如图1所示，其中，材料生产阶段占比最高，其次是使用阶段、景观维护阶段、景观建造阶段，可见控制景观碳排放的关键在于降低景观材料生产阶段的能源消耗。如图2

所示，在该小区所用景观材料中，生产单位面积或体积的材料，产生碳排放量最多的为钢筋，其次为石灰和玻璃，最少的为碎石和砂。

2.3 植物碳汇量

通过国际城小区的种植施工图可知小区内植物种类及具体数量，其中乔木14种，灌木11种，草本植物3种，国槐作为居住区内基调树种，广泛应用于园内各类植物群落，通

过计算得出乔木类、灌木类、草本类的碳汇量（表6-8），国际城小区植物年碳汇总量51.64t。

2.4 植物年碳汇量分析

该小区乔木固碳量远大于灌木和草本。乔、灌、草的固碳量分别为48.56 t、2.43 t、0.65 t，占比如图3所示，乔木单株年固碳量最高的树种为国槐，其次为榆树，乔木单株固碳量比较具体如图4所示。

表6 乔木年固碳量
Tab. 6 Annual carbon sequestration

树种 Species	单位叶面积年固碳量/g·m ⁻² ·y ⁻¹ ^[11] Carbon sequestration amount	单株叶面积量 ^[13] /m ² Leaf area per plant	株数/株 The number of plants	年碳汇量/kg Annual carbon sink
国槐	1 830.18	237.86	40	17 413.06
垂柳	1 596.86	20.40	17	553.79
圆柏	1 262.67	18.23	37	851.68
雪松	1 482.17	14.59	15	324.37
云杉	2 346.95	16.23	26	990.37
山桃	2 195.57	9.17	15	302.00
日本晚樱	2 170.39	10.35	30	7 943.77
白皮松	1 482.17	35.32	40	765.31
二球悬铃木	874.71	302.72	48	8 458.13
碧桃	2 086.45	9.17	24	539.12
紫叶李	2 023.09	87.10	36	1 884.61
侧柏	1 262.67	16.23	39	6 855.94
银杏	91.46	707.37	26	1 035.14
总计				47 917.29

表7 灌木年固碳量
Tab. 7 Annual carbon sequestration by shrubs

树种 Species	固碳量 ^[11] /g·m ⁻² ·d ⁻¹ Carbon sequestration amount	单株叶面积量/m ² Leaf area per plant	株数/株 The number of plants	年碳汇量/kg Annual carbon sink
连翘	1 559.24	0.97	80	121.00
小叶黄杨	1 166.80	1.19	96	133.30
紫荆	2 041.23	2.77	50	282.71
大叶黄杨	1 398.75	4.93	72	496.50
红瑞木	1 666.50	1.05	30	52.49
金叶女贞	1 666.50	7.71	50	642.44
紫丁香	1 077.92	3.37	48	174.36
榆叶梅	1 333.36	3.51	78	365.05
紫叶小檗	866.63	0.38	500	164.66
总计				2 432.51

表8 草本年固碳量
Tab. 8 Annual carbon sequestration of herbs

名称 Species	单位叶面积年碳汇量 ^[21] / (kg CO ₂ /m ²) Annual carbon sink per unit leaf surface	工程量 Area	年碳汇量/kg Annual carbon sink
草地早熟禾	0. 02	15 000 m ²	300.00
八宝景天	1.72	55 m ²	94.60
大花萱草	1. 93	63 m ²	121.59
鸢尾	3. 37	40	134.80
总计			650.99

2.5 居住区景观全生命周期碳平衡结果分析

根据全生命周期年碳排放量和年固碳量可统计出该小区50年内碳排放量和碳汇量，对比情况如图5所示，碳汇增长速率大于碳排，约第48年达到碳平衡，即小区景观建设48年后，景观建设完全发挥植物的正向碳汇效益。第50年植物吸收碳排放后的碳汇量为68.58 t，即该小区全生命周期为城市减碳的贡献为68.58 t的碳汇效益。

3 低碳理念下的景观全生命周期碳平衡优化策略

3.1 居住区景观减碳策略

通过对景观碳排放量分析可知，景观主要碳排放量来自材料生产阶段，但在景观全生命周期中，景观材料生产、景观建造均为一次性碳排放，不在景观建成后期继续产生，即在达到碳平衡之前，碳排放量主要由景观材料生产阶段和景观建造阶段产生，所以减少材料生产和建造期间的碳排放量能够缩短居住区景观达到碳平衡的年限，而景观使用阶段和景观维护阶段的碳排放为持续性碳排，即在达到碳平衡后，景观使用阶段和景观维护阶段很大程度上影响了碳汇效益。因此关于居住区景观减碳主要有两个途径，其一为减少景观材料生产的碳排放，其二是减少使用、维护的碳排。

3.1.1 景观材料减碳策略

景观材料的生产阶段是全生命周期碳排放量最多的时期，由图2可知，单位质量或体积的景观材料的碳排放量差异较大，所以在施工设计阶段，在保障景观功能与质量的前提下，减少高碳排材料的工程量，是降低景观全生命周期碳排放量、缩短碳平衡年限最重要的措施。以本研究为例，针对铺装在同

等功能需求下,可用大理石、花岗岩、混凝土砖这类生产碳排放量较低的材料,来替代高碳排C30陶砖,而景观小品设计可利用低碳排、可回收材料如木材、碎石、砂,代替高碳排钢、玻璃小品。在已有研究也指出所选用的园林工程材料应有20%~30%可回收利用的成分,因此随着越多的园林工程材料碳排放相关研究,应建立景观材料碳排放数据库其中包括材料能够回收利用的成分,作为景观材料选择时的参考^[23-24]。

3.1.2 景观使用、维护减碳策略

居住区景观在使用过程中的碳排大多来自照明设施,碳排放量随照明时长和照明设施类型的增加而增加,因居住区照明时长有严格的要求,无法通过减少照明时长来减少碳排,但可选择耗电量低的照明设备如节能灯、太阳能灯以节约电能,例如使用LED灯,研究发现LED灯较传统灯具能减少80%的耗电,且LED灯10万h的物理寿命可以进行回收再利用,达到最大化利用^[25]。

该小区灌溉方式为漫灌和喷灌,并无任何节水灌溉方式,研究表明节水灌溉比漫灌、喷灌节水52%,就国际城小区而言,年灌溉量达到9 879.79 t,若采用节水灌溉,能减少1 541.25 kg的碳排放量。另外雨水随污水排出,造成极大浪费,可在设计阶段考虑相关加雨污分流措施,储存部分雨水用于灌溉,从而减少自来水的灌溉量和灌溉碳排^[26]。

根据表5可知,景观维护阶段化学肥料和化学农药是高能耗、高排放来源,且化学肥料碳排放因子远高于有机肥。研究发现合成1 t有机肥料产生的CO₂量是72.77 kg,是合成1 t复合肥料的23%,合成1 t化学农药排放CO₂高达7.73 t。因此,改变以化肥为主的施肥模式,提倡有机肥,推广使用生物药剂,是

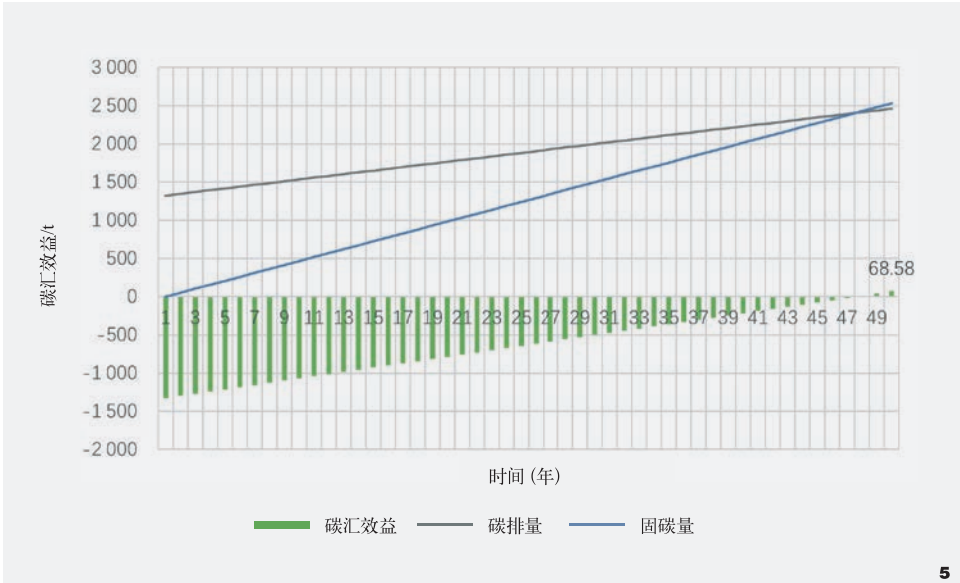


图5 碳排放量和碳汇量对比
Fig. 5 Comparison of carbon emissions and carbon sinks

日后景观减少碳排放量的重要措施、也是植物养护的必然趋势^[27]。

3.2 居住区景观增汇策略

高碳汇景观植物配置关键在于选择高固碳植物,由图3、图4可知,乔木、灌木、草本固碳量以及单株乔木固碳量差异均较大,因此增加乔木在植物景观中的配比量,增加配置乡土高固碳树种,为高碳汇绿地配置的关键,同样因草坪固碳量低,且经常需要机械修剪而产生养护碳排,所以应减少大面积草坪的占比。其次关于绿地碳汇效益在植物群落层面,已有研究发现乔灌草型绿地的碳汇能力高于灌草型和草坪型。所以绿地应尽可能配置乔灌草型群落模式,使绿地碳汇效益最高^[28],而对于乔灌草群落而言,并非植物群落层级越多、结构越复杂、密度越高群落碳汇能力越强,若密度无限制大到土地承载与植物生长空间不匹配时,植物固碳能力反而会下降,研究表明植被种植水平及垂直

郁闭度在50%~70%之间,植物群落密度在250~450株/hm²范围内,树木枝叶充分生长,植物群落固碳能力最高^[29-30]。

4 结论与讨论

景观全生命周期碳平衡分析,在于明晰全过程的碳足迹,从而规范景观建设过程,即低碳理念下的全生命周期建设指导。以甘肃省靖远县国际城小区为例,计算景观碳排放量和碳汇量,并对其进行分析,得出在景观建设48年达到碳平衡,建成使用的第50年,能够为城市减碳贡献68.58 t的碳汇效益。对全生命周期碳排放分析可得景观材料生产期间碳排放量最大1 169.19 t (47.08%),决定了景观碳平衡的年限,其次为景观使用阶段687.5 t (27.68%),影响达到碳平衡后的景观碳汇量。因此居住区减排因着重于这两阶段。基于对居住区景观碳排放结果分析,若建立景观低碳建设评价,具体应包括低碳材料、低碳使用、低碳维护三类大类,而其中

具体指标与提出的减碳策略对应，值得注意的是，低碳评价指标与单位面积景观造价、植物养护成本息息相关，可在一定的景观造价与维护成本标准范围内进行不同地区、方案的低碳评价综合比较。

研究利用光合速率法计算50年植物年碳汇量为2 530.36 t，参考植物单株年固碳量和符合植物生态适宜性研究，提出增汇策略，然而关于植物碳汇量有多种测算方法，各计算方法的原理和依据不同，适用范围、精度有差异。目前研究林业碳汇量的测算方法主要有生物量法、光合速率法、软件模拟法、遥感反演法。生物量法与光合速率法精度高，适用于小尺度；软件模拟法与遥感反演法则适用于区域、市域等较大尺度。因此在不同计算方法下，碳汇结果有差异。以居住区为例，用光合速率法计算碳汇量，虽较为符合大致尺度，但单株植物碳汇量与规格、不同的生长期有关，本文未考虑以上影响，另外，参考的叶面积方程、单位叶面积固碳量近年来研究也较少，因此光合速率法测算居住区尺度碳汇量仍有局限性，可根据各类计算方法的特性将其结合，解决树种规格和生长周期差异，所以各类绿地尺度的碳汇量计算方法仍有待进一步研究^[31-32]。

随着相关技术方法的不断深入研究，本文对日后研究景观全生命周期碳平衡有以下建议与展望：（1）建立景观项目全过程能源消耗清单，精细化明确碳足迹，为全生命周期碳排放测算与评估提供标准化参考；（2）完善各地区植物固碳量测算方法和体系，建立区域性高碳汇植物库，研究各碳汇测算方法的融合，使其应用尺度更加精确；（3）结合城市绿地分类，制定明确的区域性低碳景观定量化指标，形成城市景观低碳发展路线^[33]。

注：文中图表均由作者绘制。

参考文献

[1] 蒋子文, 金洁. 环评与排污许可工作如何支持“双碳”目标? 环境部答澎湃[N/OL]. [2023-09-26]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_24749117

[2] 袁媛, 韩焱, 张志君, 等. 居住区绿地率分区研究——以广州市番禺区为例[J]. 城市规划, 2015, 39(05): 97-104.

[3] 陈蔚镇, 刘滨谊, 黄筱敏. 基于规划决策的多尺度城市绿地空间分析[J]. 城市规划学刊, 2012(05): 60-65.

[4] 王晶懋, 齐佳乐, 韩都, 等. 基于全生命周期的城市小尺度绿地碳平衡[J]. 风景园林, 2022, 29(12): 100-105.

[5] 黄建勋, 鲁兵, 罗方. 基于全生命周期的建设工程环境成本核算分析[J]. 建筑经济, 2019, 40(03): 70-75.

[6] FAVA J. Will the Next 10 Years be as Productive in Advancing Lifecycle Approaches as the Last 15 Years?[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2006, 11(S1): 6-8.

[7] KANGHEE L. Development of a Life Cycle Assessment Program for Building (SUSB-LCA) in South Korea[J]. Building and Environments, 2009(12): 2510-2520.

[8] 林宪德. 建筑产业碳足迹[M]. 台北: 詹氏书局, 2018.

[9] 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.

[10] 罗智星, 曹雨, 田瀚元, 等. 建筑景观园林工程生命周期碳排放计算方法研究——以西安市住宅小区为例[J]. 建筑科学, 2023, 39(04): 9-18.

[11] 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(2)[J]. 中国园林, 1998, 14(2): 49-52.

[12] 董延梅, 吕敏, 俞青青, 等. 杭州花港观鱼公园常见园林树种叶面积指数分析研究[C]// 中国观赏园艺研究进展2015. 北京: 中国林业出版社, 2015: 10.

[13] 王丽勉, 胡永红, 秦俊, 等. 上海地区151种绿化植物固碳释氧能力的研究[J]. 华中农业大学学报, 2007(3): 109-111.

[14] 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.

[15] 赵兵, 张金光, 刘瀚洋, 等. 园林铺装花岗石碳排放量的测度[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2016, 40(4): 101-106.

[16] 国家发展和改革委员会. 商用车燃料消耗量试验方法: GB/T 12545.2-2001[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.

[17] 中华人民共和国生态环境部. 2019年度减排项目中国区域电网基准线排放因子[EB/OL]. (2020-12-29) [2023-10-02]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtgz/202012/t20201229_815386.shtml

[18] YANG L, YE W. Landscape Design of Garden Plants Based on Green and Low-carbon Energy Under the Background of Big Data[J]. Energy Reports, 2022, 8: 13399-13408.

[19] 萧萧, 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.

[20] 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.

[21] 李辉, 赵卫智, 古润泽, 等. 居住区不同类型绿地释氧固碳及降温增湿作用[J]. 环境科学, 1999(6): 41-44.

[22] 赵莹, 李海梅. 11种地被植物固碳释氧与降温增湿效益研究[J]. 江西农业学报, 2009, 21(1): 44-47.

[23] American Society of Landscape Architects, Lady Bird Johnson Wildflower Center, & United States Botanic Garden. The Sustainable Sites Initiative: Guidelines and Performance Benchmarks[EB/OL]. [2023-09-21]. <http://www.sustainable-sites.org/report/>

[24] Office of Sustainability and Environment. Green home remodel “Landscape Material”[EB/OL]. [2023-09-21]. <http://seattle.gov/dpd/GreenBuilding/SingleFamilyResidential/Resources/RemodelingGuides/default.asp>

[25] 薛娟, 李瑾, 段秀翔. LED节能灯在节日夜景景观中的应用设计——以济南恒隆广场圣诞夜景景观为例[J]. 山东建筑大学学报, 2012, 27(03): 311-314.

[26] 九正建材网. 全新低碳水泥减少碳排放50%以上[EB/OL]. (2012-07-10)[2023-09-21]. <http://news.jc001.cn/12/0710/670486.html>

[27] 刘洪涛, 陈同斌, 郑国砥, 等. 有机肥与化肥的生产能耗、投入成本和环境效益比较分析——以污泥堆肥生产有机肥为例[J]. 生态环境, 2010, 19(4): 1000-1003.

[28] 祝宁, 李敏, 王成, 等. 哈尔滨市绿地系统结构初步分析[J]. 东北林业大学学报, 2002(03): 127-130.

[29] 赵艳玲. 上海社区绿地植物群落固碳效益分析及高固碳植物群落优化[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.

[30] 祝月茹, 李青青, 祝遵凌. 居住区树种碳汇效益测算及环境优化提升——以南京市丁家庄为例[J/OL]. 中南林业科技大学学报: 1-11[2023-10-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1470.S.20230823.1113.002.html>

[31] 和晓彤. 面向总体规划阶段的绿地碳汇量估算方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.

[32] 李怒云, 吕佳. 林业碳汇计量[M]. 北京: 中国林业出版社, 2009.

[33] 杜栋, 庄贵阳, 谢海生. 从“以评促建”到“评建结合”的低碳城市评价研究[J]. 城市发展研究, 2015, 22(11): 7-11.