

王晶懋, 齐佳乐, 韩都, 罗宜帆. 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.

基于全生命周期的城市小尺度绿地碳平衡

Carbon Balance of Small-Scale Urban Green Space from the Perspective of Landscape Life Cycle

王晶懋 齐佳乐 韩都 罗宜帆

WANG Jingmao, QI Jiale, HAN Du, LUO Yifan

开放科学 (资源服务)
标识码 (OSID)



中图分类号: TU986

文献标识码: A

文章编号: 1673-1530(2022)12-0100-06

DOI: 10.14085/j.fjyl.2022.12.0100.06

收稿日期: 2022-01-22

修回日期: 2022-10-07

王晶懋 / 女 / 博士 / 西安建筑科技大学建筑学院副教授、西部绿色建筑国家重点实验室成员 / 研究方向为风景园林规划设计
WANG Jingmao, Ph.D., is an associate professor in the College of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, and a member of State Key Laboratory of Green Building in Western China. Her research focuses on landscape planning and design.

齐佳乐 / 女 / 西安建筑科技大学建筑学院在读硕士研究生 / 研究方向为风景园林规划设计
QI Jiale is a master student in the College of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology. Her research focuses on landscape planning and design.

韩都 / 女 / 西安建筑科技大学建筑学院在读硕士研究生 / 研究方向为风景园林规划设计
HAN Du is a master student in the College of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology. Her research focuses on landscape planning and design.

罗宜帆 / 男 / 西安建筑科技大学建筑学院在读硕士研究生 / 研究方向为风景园林规划设计
LUO Yifan is a master student in the College of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology. His research focuses on landscape planning and design.

摘要: 小尺度绿地在城市绿地中分布广、数量多, 在全球应对碳排放问题的大背景下对于达成“碳中和”目标具有重要价值。鉴于既有城市小尺度绿地低碳设计缺乏系统性的指导与流程, 以景观碳排放和碳汇为切入点, 对景观材料生产、景观建造、景观日常使用和景观维护管理全过程进行分析, 将小尺度绿地在景观全生命周期中各个阶段的碳排放和碳汇过程进行量化计算比较, 认为景观营建中要侧重高固碳地被植物模式的选取和低碳材料的运用, 筛选出 6 种乡土高固碳地被植物群落配置模式, 可用于小尺度绿地增加碳汇, 减少景观维护管理中的碳排放。提出改善城市小尺度绿地碳平衡的设计及营建方法, 总结针对城市小尺度绿地增加碳汇、减少碳排放的关键性策略, 为绿色碳汇网络构建提供科学依据与实践指导。

关键词: 碳排放; 碳汇; 景观全生命周期; 低碳景观设计; 小尺度绿地; 植物群落

基金项目: 国家自然科学基金 (编号 51908443); 陕西省社会科学基金 (编号 2022J033); 西部绿色建筑国家重点实验室自主研究课题 (编号 LSZZ202018)

Abstract: Ranking forefront among all types of urban green spaces in both distribution scope and quantity, small-scale green space plays an important role in achieving carbon neutrality in the context of the global response to carbon emission. In view of the lack of systematic guidance and procedures for the current low-carbon design of urban small-scale green space, this research, with landscape carbon emissions and carbon sinks as the entry point, conducts a whole-process analysis of landscape involving landscape material production, landscape construction, landscape daily use, and landscape maintenance and management. Additionally, the research conducts a quantitative calculation and comparison of the carbon emission and carbon sink process of small-scale green space at each stage within landscape life cycle. On this basis, the research proposes that landscape construction should focus on the selection of design modes for ground-cover plants with high carbon sequestration capacity and the use of low-carbon materials, and accordingly screens 6 localized configuration modes for ground-cover plant communities with high carbon sequestration capacity, to help increase carbon sinks, reduce carbon emissions from landscape maintenance and management. Finally, the research puts forward the methods for carbon balance improvement and construction of urban small-scale green space, and summarizes the key strategies for increasing carbon sinks and reducing carbon emissions of urban small-scale green space, in hope of providing scientific basis and practical guidance for the construction of a green carbon sink network.

Keywords: carbon emission; carbon sink; landscape life cycle; low-carbon landscape design; small-scale green space; plant community

Fund Items: The National Natural Science Fund of China (No. 51908443); Shaanxi Provincial Social Science Fund (No. 2022J033); Independent Research Project of the State Key Laboratory of Green Building in Western China (No. LSZZ202218)

1 基于生境营造的小尺度绿地全生命周期碳排放和碳汇过程

1.1 城市小尺度绿地碳平衡的重要性

城市作为各种能源消耗的载体, 近年来出

现了许多城市气候问题, 如热岛效应。如何缓解城市气候变化, 实现“碳中和”目标, 促进建设低碳城市是当今风景园林界需要着眼的研究方向^[1]。城市绿地是利用植物、水体等构建的

城市自然景观,是重要的自然碳汇载体。在进行景观设计时应考虑不同植物的固碳能力,可以通过植物配置与绿化空间设计优化来提升绿色植物的碳汇能力^[2-5]。

在降低城市碳排放的需求与城市居民对于绿地空间的需求的双重因素下,小尺度绿地体现出重要的价值。小尺度绿地的面积不能过大,本研究将小尺度绿地定义为面积在10 000 m²以内的绿地^[6]。小尺度绿地在城市绿色空间中分布广、类型丰富,在过去10年间,全球28个特大城市绿地覆盖率总体增长4.11%,所增绿量多由中小尺度绿地贡献^[7]。从区域尺度绿地空间的评估成果来看,小尺度绿地更能体现城市绿地空间的生态性与低碳效益,改善小气候的潜力和社会价值较高^[8],并且在尺度、功能方面具有多样性,在规划设计实践中可以灵活应用^[9]。国内外现有研究大多关注小尺度绿地的生态效益,对其设计、施工、管理不同阶段的碳排放和碳汇的研究较少^[10]。因此,开展城市小尺度绿地碳平衡研究,对于城市绿色空间规划与设计具有重要的指导意义。

1.2 景观全生命周期中碳排放和碳汇的转换过程

“双碳”目标下的城市绿地低碳单元设计需遵循生态学规律,通过规划设计、建设实施、管理运营3个层面构建地被植物群落模式。在景观全生命周期的范畴内,碳排放主要源于景观材料生产、景观建造、景观日常使用、景观维护管理等阶段。本研究侧重于绿地碳汇单元,通过场地评估、植物选种、种植设计、施工建造、维护管理等,建立基于监测与评价体系的全生命周期流程及量化计算方法,提出景观营建中要侧重高固碳植物配置模式的选择和低碳材料的运用,以期对低碳绿地设计具有指导意义。

近年来中国西北半干旱地区快速的城镇化进程正在不断压缩、切割城市内部生态空间,使城市内部生境质量下降,极大降低了城市内部的生物多样性,城市内部成为城市生物多样性保护与提升的薄弱之处。长期以来,人们一直将乔木作为碳汇主体而忽略了灌木和地被植物群落的碳汇效应,尤其是在

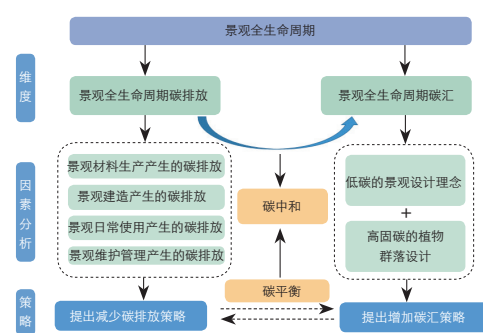
西北半干旱地区,灌木、地被的固碳总量远高于长势稀疏的乔木^[11]。地被植物群落具有稳定提高城市生物多样性和生态系统服务功能的潜力,因此,本研究以西北半干旱地区的乡土地被植物群落为研究对象,在场地设计时,根据场地光照、水分、土壤等主导生境因子进行科学合理的生境分区,为场地筛选适宜的植物群落,从一定程度上减少碳排放。本研究将景观全生命周期划分为景观材料生产、景观建造、景观日常使用和景观维护管理4个阶段,计算各阶段的碳排放并构建景观植物碳汇模型,对碳排放与碳汇的转换过程进行分析,进而提出减少碳排放和增加碳汇的策略以达到小尺度绿地碳平衡(图1)。

2 小尺度绿地景观全生命周期碳排放量化研究

2.1 样地的选取

本研究以西北半干旱地区的小尺度城市绿地为研究对象,聚焦乡土地被植物群落,选取西安建筑科技大学雁塔校区南门花园与图书馆绿地作为样地(图2、3),进行景观全生命周期量化研究。南门花园位于西安建筑科技大学南门东侧,总面积855.34 m²,其中铺装面积168.43 m²,绿地面积686.91 m²。

在植物配置方面,应满足城市典型附属绿地生境条件多样性和典型性的需求,基于生态学生态因子理论对其进行生境类型分区,并配置适宜于阳生区、建筑阴生区、建筑西照半阳生区的植物群落^[12]。南门花园经生境营造后,形成以乡土植物为主的低维护绿地,分为季节主题层、结构层、地被层3个层次。其中,季节主题层植物主要包括橙花糙苏(*Phlomis fruticosa*)、绵毛水苏(*Stachys byzantina*)、云南蓍(*Achillea wilsoniana*)、野菊(*Chrysanthemum indicum*)、八宝(*Hylotelephium erythrostictum*)、细叶针茅(*Stipa lessingiana*)、小兔子狼尾草(*Pennisetum alopecuroides*)、桔梗(*Platycodon grandiflorus*)、匍枝毛茛(*Ranunculus repens*)、地榆(*Sanguisorba officinalis*)、鸢尾(*Iris tectorum*)、葱莲(*Zephyranthes candida*)、过路黄(*Lysimachia christinae*)、羽瓣石竹(*Dianthus plumarius*)、涝峪薹草(*Carex giraldiana*)和麦



1 景观全生命周期过程
Landscape life cycle process

冬(*Ophiopogon japonicus*);结构层包括美国薄荷(*Monarda didyma*)、假龙头花(*Physostegia virginiana*)、迷迭香(*Rosmarinus officinalis*)、细叶芒(*Miscanthus sinensis*)、聚合草(*Symphytum officinale*)以及毛地黄钓钟柳(*Penstemon digitalis*);地被层包括蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、垂盆草(*Sedum sarmentosum*)、佛甲草(*Sedum lineare*)、灯芯草(*Juncus effusus*)等。

图书馆绿地位于图书馆西侧,面积800 m²,其中铺装面积116 m²,绿地面积684 m²,基地内植物采用单一草坪草种植,人工种植并定期维护管理。为对比低维护绿地的低碳效能,将图书馆绿地作为对照组进行观察。

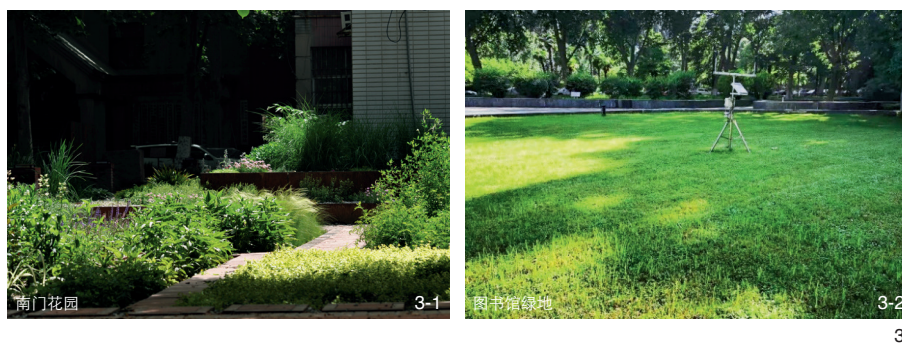
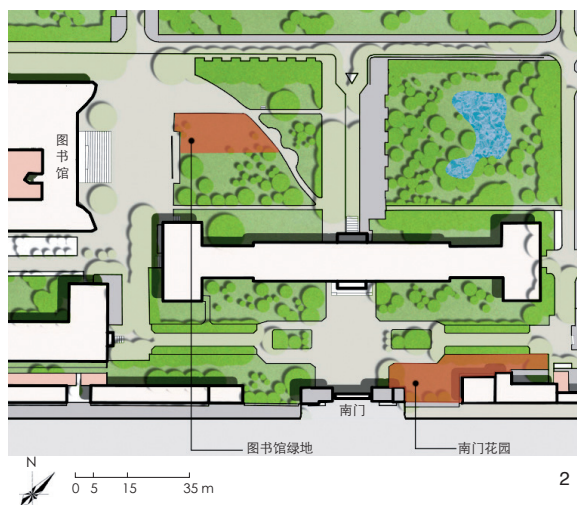
2.2 景观全生命周期碳排放量化计算

景观全生命周期清单分析是对景观营建的各个阶段的碳排放和碳汇因素进行汇总,内容包括材料的种类及数量、运输方式、能源消耗、运营维护及植物碳汇等数据清单,将观测数据与相对应的碳排放因子(碳排放系数)相乘,得到每一个阶段的碳排放和碳汇量,进而得出景观全生命周期总的碳排放和碳汇量。在景观全生命周期中,每个阶段都有相应的材料使用和能源消耗清单,分别计算每阶段的碳排放和碳汇量然后再汇总,得到景观全生命周期的碳排放和碳汇总量,分别如式(1、2)所示^[13]:

$$C=C_1+C_2+C_3+C_4, \quad (1)$$

$$S=S_1。 \quad (2)$$

式中: C 为景观全生命周期碳排放总量; C_1 为景观材料生产阶段碳排放总量; C_2 为景观建造阶段碳排放总量; C_3 为景观日常使用阶



2 西安建筑科技大学雁塔校区样地选点
Sample sites selection for Yanta Campus of Xi'an University of Architecture and Technology
3 南门花园 (3-1) 与图书馆绿地 (3-2) 现状
Current status of the South Gate Garden (3-1) and the green space outside the library (3-2)

表 1 景观材料生产阶段产生的碳排放量
Tab. 1 Carbon emissions from the production of landscape materials

样地名称	材料名称	质量 (体积)	碳排放因子	碳排放量 /kg
南门花园	C30 陶砖	18.50 t	735.00/kg CO ₂ e · t ^{-1[14]}	13 597.50
	钢板	0.24 t	2 050.00/kg CO ₂ e · t ^{-1[14]}	492.00
	大理石	22.50 m ³	39.89/kg CO ₂ e · m ^{-3[14]}	897.53
	花岗岩	4.50 m ³	142.48/kg CO ₂ e · m ^{-3[15]}	641.16
	压模混凝土	4.50 m ³	439.00/kg CO ₂ e · m ^{-3[14]}	1 975.50
	混凝土砖	4.50 m ³	336.00/kg CO ₂ e · m ^{-3[14]}	1 512.00
	总计			19 115.69
图书馆绿地	混凝土砖	45.00 m ³	336.00/kg CO ₂ e · m ^{-3[14]}	15 120.00
	总计			15 120.00

注：碳排放量的计算方法为不同单位的材料数量与对应材料的碳排放因子的乘积（后表相同）。

表 2 景观建材运输过程产生的碳排放量
Tab. 2 Carbon emissions from the transportation of landscape materials

样地名称	材料名称	耗油量 /L	碳排放因子 /kg CO ₂ e · L ⁻¹	碳排放量 /kg
南门花园	陶砖	13.44	2.63 ^[16]	35.35
	石材	4.48	2.63 ^[16]	11.78
	花岗岩	4.48	2.63 ^[16]	11.78
	压模混凝土	4.48	2.63 ^[16]	11.78
	混凝土砖	4.48	2.63 ^[16]	11.78
	总计			82.47
图书馆绿地	混凝土砖	8.96	2.63 ^[16]	23.56
地	总计			23.56

段碳排放总量； C_4 为景观维护管理阶段碳排放总量； S 为景观全生命周期碳汇总量； S_1 为景观植物碳汇总量；单位为 kg。

2.2.1 景观材料生产阶段碳排放总量

根据以往研究，景观全生命周期中景观材料生产阶段的碳排放量占比最多，原材料获取以及材料加工过程中往往伴随着化石能源的大量消耗。南门花园在景观设计的初始阶段就减少了高消耗材料的运用，使用的建造材料有 6 种，主要用于铺装、花池，根据 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》^[14] 以及相关研究^[15]，得出南门花园在景观材料生产阶段产生的碳排放总量为 19 115.69 kg（表 1）。

图书馆绿地内的铺装材料为混凝土砖，在材料生产中产生的碳排放较多，共为 15 120.00 kg。根据比较得知，南门花园与图书馆绿地在材料生产过程中碳排放量差距不大。2 块样地都是以游览观赏为主的场所，需要硬质铺装满足活

动功能。根据材料的碳排放对比得知，在材料生产过程中，天然材料（如大理石、花岗岩等）的碳排放因子较低，其中花岗岩生产过程中的碳排放量是同等体积压模混凝土的 1/3。

2.2.2 景观建造阶段碳排放总量

景观建造阶段产生的碳排放来源于材料运输和建造施工两方面。南门花园与图书馆绿地都为 1 000 m² 以内的附属绿地，工程量较小且不需要大型机械，建造施工均为人力，故建造施工产生的碳排放暂且忽略不计，这里只讨论景观材料运输产生的碳排放，包括景观建材运输和景观植物运输两类。

1) 景观建材运输产生的碳排放。南门花园内的景观建材均选自西安市周边，运输车辆选用 4.2 m 长、载重 10 t 的货车，其碳排放因子来自中国碳排放数据库，每千米耗柴油 0.2 L^[16]，计算得出南门花园在景观建材运输过程中的碳排放量为 82.47 kg。图书馆绿地的

景观建材也是就近运输，产生的碳排放量为 23.56 kg（表 2）。

2) 景观植物运输产生的碳排放。花园内的景观植物采用西北地区本土植物，均由市内苗圃提供，运输车辆为中小型面包车，每千米消耗汽油 0.12 L^[16]，计算得出南门花园在植物运输过程中产生的碳排放量为 72.13 kg。图书馆绿地的植物景观是单一品种的草坪草，运输过程中的碳排放量为 92.41 kg（表 3）。

南门花园与图书馆绿地的碳排放量在建造阶段相差不大，由此可见，材料运输的碳排放量取决于能源的消耗，而运输距离与车辆型号决定汽油或柴油的消耗量，因此缩短运输距离和就地取材是减少碳排放的有效方法。

2.2.3 景观日常使用阶段碳排放总量

2 块样地在使用过程中的碳排放主要来自照明设备，包括路灯和草坪灯。采用中国区域电网西北地区的碳排放因子^[17]来测算

表3 景观植物运输产生的碳排放量

Tab. 3 Carbon emissions from the transportation of landscape plants

样地名称	项目	耗油量 /L	碳排放因子 /kg CO ₂ e · L ⁻¹	碳排放量 /kg
南门花园	地被植物运输	31.36	2.30 ^[16]	72.13
图书馆绿地	草皮运输	40.18	2.30 ^[16]	92.41

表4 景观日常使用阶段产生的碳排放量

Tab. 4 Carbon emissions from the daily use of landscape

样地名称	照明设施名称	年耗电量 /kw	碳排放因子 / kg CO ₂ e · kw ⁻¹	年碳排放量 /kg
南门花园	高杆灯	134.40	0.89 ^[17]	119.62
	草坪灯	87.60	0.89 ^[17]	77.96
	总计			197.58
图书馆绿地	高杆灯	336.00	0.89 ^[17]	299.04
	草坪灯	122.64	0.89 ^[17]	109.15
	总计			408.19

表5 南门花园景观维护管理阶段产生的碳排放量

Tab. 5 Carbon emissions from the maintenance and management of landscape in the South Gate Garden

项目	耗油量 /L	碳排放因子 /kg CO ₂ e · L ⁻¹	年碳排放量 /kg
地被植物运输	6.27	2.30 ^[16]	14.42

表6 图书馆绿地景观维护管理阶段产生的碳排放量

Tab. 6 Carbon emissions from the maintenance and management of landscape in the green space outside the library

项目	施工频率	消耗量 /L	碳排放因子 / kg CO ₂ e · L ⁻¹	年碳排放量 /kg
机械修剪(机油)	2个月1次	1.20	2.30 ^[16]	2.76
灌溉用水	1周1次(冬季除外), 1年36次	720.00	0.168 ^[14]	120.96
各种杀虫剂	集中于春夏两季, 1月 2次, 1年12次	12.00	7.73 ^[18]	92.76
总计				216.48

照明设备的碳排放。南门花园内的照明设施使用时间冬天为 18:00—23:00, 夏季为 19:00—24:00, 按照每天 5 h 计算。南门花园在日常使用过程中产生的年碳排放量总计 197.58 kg, 图书馆绿地为 408.19 kg (表 4)。由于南门花园距校园主路较远, 对于照明的需求并不多; 而图书馆绿地临近校园主路, 对照明的需求较多, 产生的碳排放相对南门花园较多。

2.2.4 景观维护管理阶段碳排放总量

景观维护管理过程中产生的碳排放主要来自材料的更新、植物的养护及补种。由于南门花园遵循低维护设计原则, 园内植物对灌溉和肥料的需求较少, 主要碳排放来源于植物的补种运输, 每年景观维护管理产生的碳排放量为 14.42 kg。图书馆绿地为草坪, 需要定期维护, 包括修剪、灌溉和使用杀虫剂等, 每年景观维护管理所产生的碳排放量为 216.48 kg (表 5、6)。南门花园的低维护景观设计保证了其不必像图书馆绿地那样进行烦琐的后期维护, 仅需在绿地植物不足时进行补充, 减少了人力物力的消耗, 也减少了碳排放。

3 小尺度绿地景观全生命周期碳汇量化研究

3.1 碳汇计算模型与方法

本研究中植物碳汇的测算办法: 采用 Li-

6400 便携式光合测定仪对植物进行一年四季的观测; 在晴天时对所选植物的光合速率进行测定, 8:00—18:00 每 2 h 测定 1 次, 选择同种的生长良好的 3 株为待测植物, 每株植物选择多个叶片进行观测, 每个叶片取 3~6 个瞬时光合速率值作为重复。假定光合有效辐射每天按 10 h 计算^[19-21], 则植物同化量为:

$$P = \sum_{i=1}^j \left[\frac{(P_{i+1} + P_i)}{2} (t_{i+1} + t_i) \times (3600/1000) \right], \quad (3)$$

通过测定, 将日同化总量换算为日单位叶面积固碳量,

$$C_{s1} = P \times 44. \quad (4)$$

式中: P 为植物的日同化总量, 单位为 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; P_i 为初测点 i 的瞬时光合作用速率, 单位为 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; P_{i+1} 为 $i+1$ 测点的瞬时光合作用速率, 单位为 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; t_i 为初测点 i 的测量时间; t_{i+1} 为 $i+1$ 测点的测量时间; C_{s1} 为植物单位叶面积固碳量, 单位为 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

3.2 不同植物配置的碳汇量化比较研究

上述 2 块样地景观全生命周期的碳汇多数由绿地中地被植物的光合作用强度决定, 经测算, 南门花园植物群落的第一年碳汇总量为 15 975.49 kg, 图书馆绿地植物第一年碳汇总量为 882.97 kg (表 7)。南门花园多年生地被植物构建的植物群落, 形成了具有稳定结构的高固碳模式, 固碳效益较高; 而图书

馆绿地植物品种单一, 固碳效益较差。对南门花园内的植物进行 1 年的观测, 以光照条件为变量探讨不同光照条件对植物固碳能力的影响。针对不同的光照条件(如阳生区、建筑阴生区、建筑西照半阳生区)对植物群落进行观测, 可得出南门花园植物固碳数据。对南门花园样方内的植物群落进行持续观测, 通过存活率、生长势等对植物群落进行筛选, 得到 21 个植物群落模式, 经测算对比, 毛地黄钟柳 + 绵毛水苏组合的固碳能力大于绵毛水苏 + 八宝组合, 灯芯草 + 涝峪薹草组合大于灯芯草 + 橙花糙苏组合, 由此可看出植物群落搭配对植物固碳能力具有影响。

绿地面积相同的条件下, 南门花园年固碳量远高于图书馆绿地, 其原因是南门花园的植物多为乡土植物, 对环境适应良好且生长旺盛。相反, 图书馆绿地的草坪草在秋冬季节可能会长势不良, 植物的碳汇量降低。

4 小尺度绿地碳排放和碳汇比较与优化策略

4.1 全生命周期碳平衡量化比较

经比较可知, 南门花园的景观全生命周期第一年的年碳排放量为 19 482.29 kg, 景观全生命周期年固碳量为 15 975.49 kg, 大约到植物群落稳定后两年达到碳平衡; 而图书馆绿地的景观全生命周期的第一年的年碳排放

表 7 研究样地的景观全生命周期不同阶段第一年的碳排放和碳汇

Tab. 7 Carbon emissions and carbons sinks at different stages within landscape life cycle of the sample plots in the first yeat 单位: kg

样地	碳排放				碳汇
	景观材料生产阶段	景观建造阶段	景观日常使用阶段	景观维护管理阶段	植物固碳阶段
南门花园	19 115.69	154.60	197.58	14.42	15 975.49
图书馆绿地	15 120.00	115.97	408.19	216.48	882.97

表 8 基于光照条件的不同生境类型高固碳地被植物群落配置模式

Tab. 8 Configuration modes for ground-cover plant community with high carbon sink capacity in a variety of habitats based on light conditions

生境类型	生境特征	设计策略	植物群落配置模式
建筑阴生区	适宜种植耐旱喜阴乡土植物, 有建筑墙面或挡墙遮挡, 保证美观的同时可减少养护	低碳主导的群落模式 群落多样性主导, 兼具低碳效应	模式一: 八宝 + 美国薄荷 + 灯芯草 模式二: 垂盆草 + 蒲公英 + 地榆 + 野菊
建筑西照半阳生区	适宜种植耐高温、耐水湿阳生植物, 保持场地内的水分与样方植物完整性	低碳主导的群落模式 群落多样性主导, 兼具低碳效应	模式三: 八宝 + 毛地黄钓钟柳 模式四: 橙花糙苏 + 灯芯草 + 云南薯
阳生区	适宜种植耐高温、耐旱阳生植物, 适合采用树皮等地表覆盖物, 控制土壤水分蒸发, 减少灌溉量	低碳主导的群落模式 群落多样性主导, 兼具低碳效应	模式五: 橙花糙苏 + 涝峪藁草 + 美国薄荷 + 灯芯草 模式六: 八宝 + 毛地黄钓钟柳 + 美国薄荷 + 灯芯草 + 涝峪藁草

量总计为 15 860.64 kg, 景观全生命周期年固碳量为 882.97 kg, 达到碳平衡需要 17.9 年。

从景观全生命周期的各个阶段来看, 在材料生产阶段, 上述 2 块小尺度绿地的年碳排放量相差不多, 这是由于目前对材料的生产与使用还没有一个明确的低碳策略, 国内对于材料生产方面减少碳排放的研究较少; 在景观建造阶段, 碳排放大多来自运输能耗, 2 块绿地都采用市内运输, 所以运输方面的碳排放没有较大差异; 在景观日常使用阶段, 照明设施的使用情况对碳排放有很大影响, 图书馆绿地对于照明需求较高, 所以产生的碳排放更多。经对比得知, 南门花园高固碳植物群落第一年的碳汇量为 15 975.49 kg, 图书馆绿地为 882.97 kg, 南门花园的碳汇量约是图书馆绿地的 18 倍 (表 7)。

4.2 低碳排: 景观全生命周期设计方法

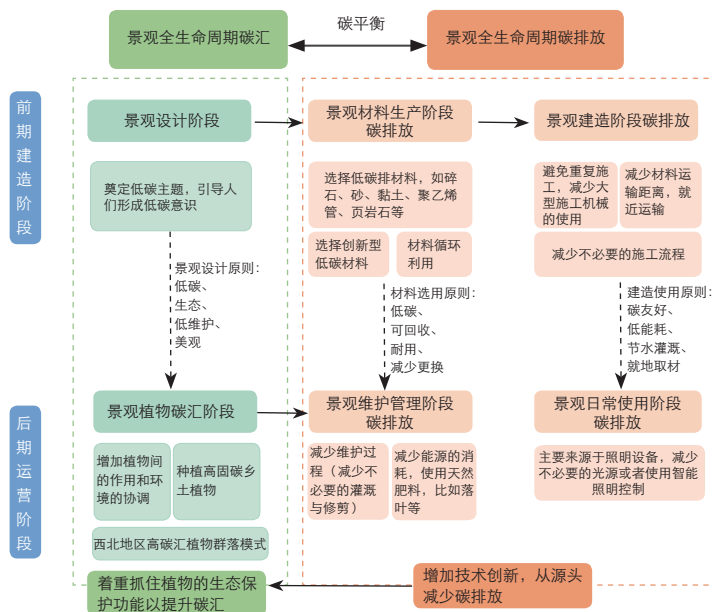
景观设计过程虽然不产生碳排放和碳汇, 但低碳设计原则可以指导整个设计过程, 对景观全生命周期的碳排放与固碳过程起决定性作用。在设计中以低碳低维护为核心策略,

选择低碳耐用材料, 减少不必要的硬质面积, 平衡游憩与碳汇减排功能, 并且应就近选择建筑材料^[21], 减少景观施工阶段碳排放; 在植物配置方面应优先乡土植物, 以减少景观维护管理阶段的修剪和灌溉等维护措施及能源消耗 (图 4)。

4.3 高固碳: 景观植物设计阶段碳汇优化策略

植物的选择关系到城市绿地建成后其碳汇量的大小, 因此应以关中地区高固碳植物名录及乡土植物名录为依据, 结合植物群落设计理论和生态学竞争-胁迫耐受-传播定植 (competitor-stress tolerator-ruderal, CSR) 策略等相关理论, 开展西北半干旱地区高固碳植物群落模式设计。

植物固碳是景观全生命周期碳汇的主要途径, 本研究 2 块样地所选取的植物类型皆为地被, 但南门花园植物群落约是图书馆绿地年固碳量的 18 倍。经综合分析得出以下结论: 1) 在植物选择方面, 应增加乡土植物的应用, 形成相对稳定的植物群落, 使固碳效



4 小尺度绿地低碳排高固碳的措施

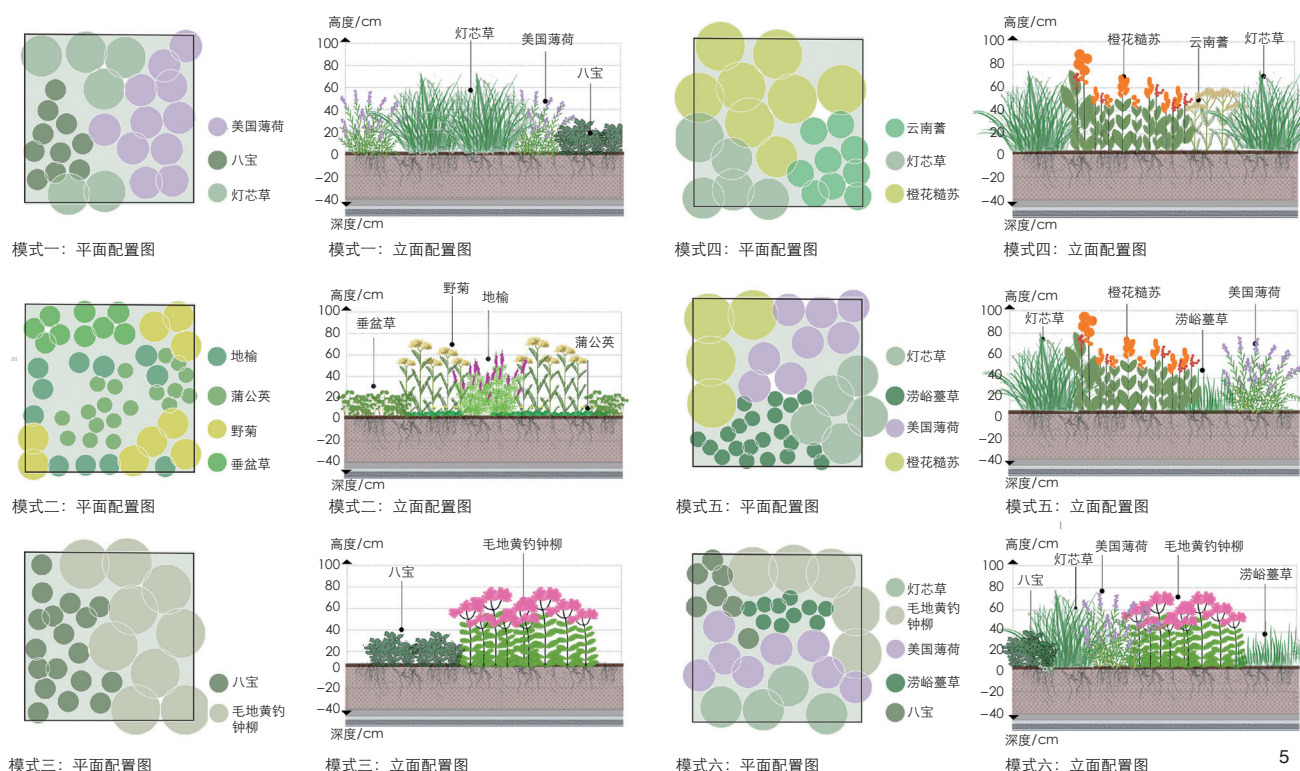
Measures for low carbon emission and high carbon sequestration of small-scale green space

益最大化; 2) 在植物配置方面, 景观植物种群组合形成的植物群落的固碳效益高于单一植物种植, 所以适宜的植物配置模式对于增加植物碳汇很重要。

植物群落的固碳能力取决于植物群落生态稳定性, 本研究参照西北地区稳定性高的原生地被植物群落的结构, 对样地进行植物配置。按照低维护、多样性、生态性、美观性的原则构建植物群落, 将具有不同固碳能力的植物进行搭配, 以达到更高的固碳效益, 同时, 低维护的设计又能减少后期养护产生的碳排放^[23-24]。通过样地实验, 最后形成了 6 种西北地区高固碳植物群落配置模式 (表 8、图 5)。其垂直结构一般为 2~3 层, 物种数为 3~6 种, 并使群落形成互利共生的稳定种间关系^[25-27]。

5 结语

在“双碳”目标驱动下, 如何遵循绿色低碳理念, 在城市有限的绿地空间条件下实现“碳中和”目标, 提升城市绿地植物固碳效益, 成为新时代景观营造必须思考和解决



5 高固碳地被植物群落配置模式

Configuration modes for high carbon sink ground-cover plant communities

的科学问题。考量景观全生命周期中碳排放和碳汇的平衡状况，是低碳景观营造的重要检验标准。这为城市小尺度绿地低碳设计以及低碳草本植物群落配置提供了科学依据。

参考文献 (References):

- [1] 刘长松. 气候变化背景下风景园林的功能定位及应对策略[J]. 风景园林, 2020, 27(12): 75-79.
- [2] CONINE A, XIANG W N, YOUNG J, et al. Planning for Multi-purpose Greenways in Concord, North Carolina[J]. Landscape and Urban Planning, 2004, 68(2): 271-287.
- [3] BRACK C L. Pollution Mitigation and Carbon Sequestration by an Urban Forest[J]. Environmental Pollution, 2002, 116(S1): 195-200.
- [4] 包志毅, 马婕婷. 试论低碳植物景观设计和营造[J]. 中国园林, 2011, 27(1): 7-10.
- [5] GALINA C, DANIEL G, BROWN G K. Carbon Stored in Human Settlements: The Conterminous United States[J]. Global Change Biology, 2010, 6(1): 135-143.
- [6] 王向荣, 林菁. 小尺度中的探索[J]. 中国园林, 2012, 28(4): 5-9.
- [7] 干靓, 郭光普, 姚雪艳. 城市街旁绿地的生物多样性支持功能及其环境影响: 以上海世纪大道街旁绿地鸟类研究为例[J]. 风景园林, 2019, 26(1): 47-52.
- [8] HUANG C H, YANG J, LU H, et al. Green Spaces as an Indicator of Urban Health: Evaluation Its Changes in 28 Mega-Cities[J]. Remote Sensing, 2017, 9(12): 1266.
- [9] 刘晖, 曹朔, 陈宇. 城市绿色空间生境样方构成与形态要素: 以西安为例[J]. 风景园林, 2021, 28(6): 70-75.
- [10] DANIELS B, ZAUNBRECHER B S, PAAS B, et al. Assessment of Urban Green Space Structures and Their Quality from a Multidimensional Perspective[J]. Science of the Total Environment, 2018, 615: 1364-1378.
- [11] 刘晖, 徐鼎黄, 李莉华, 等. 西北大中城市绿色基础设施之生境营造途径[J]. 中国园林, 2013, 29(3): 11-15.
- [12] 刘晖, 王晶懋, 吴小辉. 生境营造的实验性研究[J]. 中国园林, 2017, 33(3): 19-23.
- [13] 冀媛媛, 罗杰威, 王婷, 等. 基于低碳理念的景观全生命周期碳排放和碳汇量化探究: 以天津仕林苑居住区为例[J]. 中国园林, 2020, 36(8): 68-72.
- [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. 商用车辆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) [2021-12-02]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtz/202012/t20201229_815386.shtml.
- [18] 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.
- [19] 刘海荣, 宋力, 鲜靖苹. 5种常用灌木固碳释氧能力的比较研究[J]. 安徽农业大学学报, 2009, 36(2): 204-207.
- [20] 约翰逊, 威克恩. 实用多元统计分析[M]. 陈旋, 叶俊, 译. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [21] 于雅鑫, 胡希军, 金晓玲. 12种木兰科乔木固碳释氧和降温增湿能力研究[J]. 广东农业科学, 2013, 40(6): 47-50.
- [22] 王琳飞, 王国兵, 沈玉娟, 等. 国际碳汇市场的补偿标准体系及我国林业碳汇项目实践进展[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2010, 34(5): 120-124.
- [23] WANG J M, LIU H, WU X H, et al. Effects of Different Types of Mulches and Legumes for the Restoration of Urban Abandoned Land in Semi-arid Northern China[J]. Ecological Engineering, 2017, 102(5): 55-63.
- [24] 殷利华, 杭天, 徐亚如. 武汉园博园蓝绿空间碳汇绩效研究[J]. 南方建筑, 2020(3): 41-48.
- [25] 杭焯. 新自然主义生态种植设计理念下的草本植物景观的发展与应用[J]. 风景园林, 2017, 24(5): 16-21.
- [26] 王晶懋, 刘晖, 吴小辉, 等. 基于场地小气候特征的草本植物群落设计研究[J]. 风景园林, 2018, 25(4): 98-102.
- [27] WANG J M, ZHENG L J, LIU H, et al. The Effects of Habitat Network Construction and Urban Block Unit Structure on Biodiversity in Semiarid Green Spaces[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, 192(4): 1-23.

图表来源 (Sources of Figures and Tables):

图1~2由姚盈羽绘制; 图3由齐佳乐拍摄; 图4、表1~8由齐佳乐绘制; 图5由高洁绘制。

(编辑 / 李卫芳)