城市生态系统高碳汇与可持续设计

基于全生命周期的城市绿地碳库构建与碳汇量化*

王晶懋[1,2] 齐 鑫[2] 刘 晖[1,2] 达良俊[2] 徐冰洁[1] 赵婧雅[1] 刘雨萌[3]

1 西安建筑科技大学建筑学院 西安 710055
2 西安建筑科技大学交叉创新研究院 西安 710055
3 瓦赫宁根大学景观建筑与规划组 瓦格宁根市 6700 HB

摘要:【目的】通过对绿地“植物-土壤-水体-大气”多要素碳汇量与碳储量的碳库核算,为精确量化评估绿地碳汇效益提供指导。【方法】以秦汉新城渭河生态景观带西段绿地为例,通过构建绿地碳库核算其静态碳储量,并基于全生命周期法进行绿地碳汇碳排动态量化及碳中和推演,形成城市绿地碳汇效益综合量化方法。【结果】秦汉新城渭河生态景观带西段绿地现状碳汇量为 181.68 t,碳排放量为 2 848.24 t,是碳排库,需 16 年达到碳中和;碳库碳储量为 1 652.17 t;碳密度为 12.79 kg·m^{-2},植物碳库碳密度大于表层土壤有机碳库;林地型、灌地型和地被型绿地碳库的碳密度分别是 18.83 kg·m^{-2}、7.18 kg·m^{-2}、4.23 kg·m^{-2},碳库指数分别为 1.295、1.38、0.87。【结论】影响绿地碳汇效益的要素有植物、土壤和养护管理,据此提出城市绿地碳汇效益提升策略和 7 种高碳汇绿地植物群落模式,从增汇减排两方面将碳中和年限缩短 5.13 年。

关键词:城市绿地;碳库构建;全生命周期;碳汇;碳排
DOI:10.12169/zgcsly.2025.01.26.0002

Construction of Urban Green Space Carbon Stocks Based on the Whole Life Cycle and Carbon Sink Quantification

Wang Jingmao[1,2] Qi Xin[2] Liu Hui[1,2] Da Liangjun[2] Xu Bingjie[1] Zhao Jingya[1] Liu Yumeng[3]
(1. College of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Institute for Interdisciplinary and Innovative Research, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. Landscape Architecture Group, Wageningen University & Research, Wageningen 6700 HB, The Netherlands)

Abstract:【Objective】To provide guidance for precise quantitative assessment of carbon sink of green spaces through the "plants - soil - water bodies - atmosphere" multi-element accounting of carbon sink and carbon storage in green spaces. 【Method】Taking the green space in the western section of the Wei River Ecological Landscape Belt in Qinhan New Town as a study case, the paper develops a comprehensive method to quantify the benefits of carbon sink in urban green spaces by constructing a green space carbon stock to calculate its static carbon storage and conducting dynamic quantification of green space carbon sinks and carbon emissions and the simulation of carbon neutrality based on the whole life cycle method.

收稿日期:2025-01-26
* 基金项目:国家自然科学基金(52394223);陕西省自然科学基金项目(2023-JC-QN-0525);陕西省科技厅青年项目(2024JC-YBQN-0602);陕西省教育厅专项科研计划项目(23JK0507);西安建筑科技大学研究生教育综合改革研究与实践项目“风景园林博士专业学位研究生教育五体联动机制建设”(ZHGG202416)
第一作者:王晶懋(1988-),女,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为风景园林植物景观设计、低碳景观设计。E-mail:airainmail@126.com

【Result】 The current carbon sink of the selected section is 181.68 t, while the carbon emission is 2 848.24 t, making it a carbon emitter. It will take 16 years to achieve carbon neutrality. The carbon storage of the carbon pool is 1 652.17 t. The carbon density is 12.79 kg · m^{-2}, while the plant carbon pool has a higher carbon density than the surface soil organic carbon pool. The carbon densities of forest-type, shrub-type and ground-cover-type green spaces are 18.83 kg · m^{-2}, 7.18 kg · m^{-2} and 4.23 kg · m^{-2}, respectively, and their carbon pool indices are 1.295, 1.38 and 0.87, respectively. 【Conclusion】 The factors influencing the carbon sink of green spaces are vegetation, soil characteristics, and maintenance & management practices. Based on this, the strategies to enhance the carbon sink of urban green spaces, along with seven plant community models designed for high-carbon-sink green spaces are proposed, aiming to shorten the timeline of carbon neutrality by 5.13 years from both the enhancement of carbon sequestration and the reduction of emissions.

Keywords: urban green space; carbon pool construction; whole life cycle; carbon sink; carbon emission

IPCC 第6次评估报告明确指出，大气中 CO_2 浓度相对于工业革命前的285 ppm升高了47.3%，全球气候变化已成为全人类的共识。世界上的很多环境问题都与气候变化密切相关[1]，气候变暖的每次增量都将进一步放大，进而导致长期的、不可逆转的影响[2]。我国政府提出在2060年前实现“碳中和”，当前中国陆地生态系统碳汇可抵消约7%~15%的人为 CO_2 排放[3]。城市碳排放量在全球中份额持续增加[4]，城市绿地成为碳汇建设的关键，城市绿地碳汇效益的科学量化是增汇减排路径规划的基础。而城市绿地由建筑、植物、土壤、水体等通过物理、化学或生物过程从大气中吸收、固存 CO_2[5]，其碳元素存在形式多样，需从整体层面把握，才能明确其真实碳汇效益[6]，系统提升碳汇。

目前，碳汇测算方法有样地清查法、软件模拟法、遥感反演法、涡度相关法等[7-10]。碳汇研究逐渐从碳储量测量发展到多尺度、多因素的综合评估，但多聚焦于单一碳库（植物或土壤）或局部过程，未构建系统全面的测算体系[11]，导致碳汇效益被低估。在城市绿地空间约束下，绿地存量空间碳汇提升成为重要路径。从增汇减排两方面分析绿地碳汇提升潜力：首先，城市绿地的景观实践（规划、设计、施工和管理）动态过程导致长期生态影响[12]，碳足迹分析的系统量化可挖掘其生命周期减排潜力[13]。其次，城市绿地碳库将绿地全要素整合，即将植物、土壤、枯落物纳入统一框架，结合自然与人为驱动因素，覆盖碳固定、储存、释放的动态过程，为系统提升碳汇提供指导。因此，基于绿地的全生命周期构建“全要素-全流程”的绿地碳库系统，是突破传统研究瓶颈的关键。

西北地区气候干旱、水资源短缺，叠加气候变化与城市化的双重压力，其脆弱性和敏感性显著增强。近5年，西北地区1/3的绿地面积增幅超过全国平均水平，但其生态效益并不显著[14]，反映了当前绿地建设与环境承载力脱节，亟待通过精准量化绿地碳汇效益，建立适配干旱区特征的提质增效路径[15]。本研究基于全生命周期法对城市绿地“植物-土壤-水体-大气”多要素进行解析，构建绿地碳库并进行碳储量系统核算与碳汇碳排动态量化，推演碳循环过程，为破解西北地区绿地碳汇的低效困境提供科学依据。

1 研究区概况

以位于陕西省西咸新区的秦汉新城渭河生态景观带西段绿地为研究场地，四周与道路相隔，共12.92 hm^2，属温带季风气候。中部是以地被为主的秦陌花塘新建区，于2024年4月建成，管理频次划分等级由强到弱依次为人工草坪>花境群落>人工花海>野花草甸；两侧为林灌区，于2013年建成，不包括水域，其养护管理强度均质化。场地共有植物107种，包括乔木17种，灌木11种，地被植物79种。场地原为廊道型绿地，现开发为郊野公园，但内部破碎化严重：林地型绿地（林灌草型、林灌型、林草型）和地被型绿地（野花草甸、人工草坪、人工花海、花境组构群落）以大片斑块存在；灌地型绿地零碎分布于边缘；硬质铺装以园路为主，集中分布于中部和东

北侧，占比为 7%。

2　研究方法

本研究于 2024 年 4—11 月，采用分层取样法设置 10 m×10 m 的林地群落样地 22 个，2 m×2 m 的灌草群落样地 4 个、竹林群落样地 2 个，1 m×1 m 的地被群落样地 26 个，共计 54 个。研究用碳储量描述碳库大小，碳密度表示碳库的固碳潜力；以年固碳量表示碳汇量；用碳库指数表征土壤碳库变化，等于样品土壤有机质含量除以参考土壤有机质含量，以陕西渭河平原为参考土壤进行计算。

2.1　全生命周期城市绿地碳库构建

将绿地全生命周期分为建植前后两个阶段，分析其碳排放量和碳汇量。城市绿地通过植物、土壤、水体等自然碳汇库和施工管理碳排库实现循环[4]（图 1）。碳库的有效碳汇量为固碳量减去碳排放量，结果为负则为碳排库（净排放源），正则为碳汇库（净吸收源）。新建项目由于初期施工成为碳排库，经碳汇作用的长期缓解平衡，其碳中和年限等于碳排放量除以碳汇量[16]。

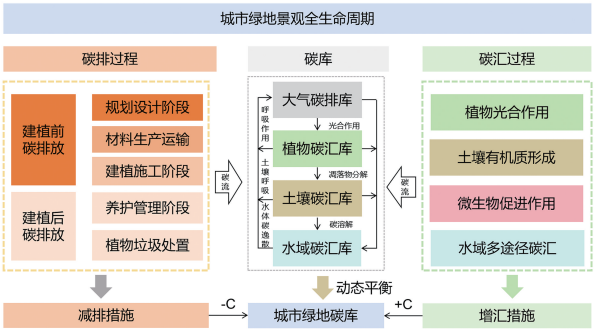


图 1　城市绿地碳平衡过程

2.2　城市绿地碳汇碳储量化过程

城市绿地短期碳汇过程以植物固碳为主。碳汇库大小依据子碳库（植物、土壤、水域等）碳储量加和得到，具体测算如表 1 所示。

表 1　城市绿地碳库碳储量及碳汇量的量化方法

碳库类型	碳储量、碳汇量			量化方法
植物碳库 $C_{植物}$	活植株	乔灌木	地上碳储量	i-Tree 模型
			地下碳储量	根茎比率（R）
			年固碳量	i-Tree 模型
		地被	年固碳量	同化法
	枯死物	枯枝落叶碳储量		收获法
		死木	枯立木碳储量	地上：生物量方程法（基于胸径）
				地下：根茎比率（R）
			枯倒木碳储量	生物量方程法（基于体积与密度）
土壤碳库 $C_{土壤}$	土壤有机碳储量		土壤有机碳	重铬酸钾容量法
			土壤微生物量碳	TOC-VCPH 有机碳分析仪
水域碳库 $C_{水域}$[17]	水体碳汇量			$W_w = Z$ 水体$\times A$ 水体
				$W_p = Z$ 水生植物$\times A$ 水生植物
				$W_s = Z$ 沉积物$\times A$ 沉积物
				$W = W_w + N\times$（$W_p + W_s$）

注：W–水体总碳汇；W_w–水体碳汇量；Wp–水生植物年固碳量；W_s–沉积物年碳汇；Z–固碳速率；A–面积；N–计算总时间；单位–年。

2.3　城市绿地碳排放量计算

绿地建植前阶段，碳排放量通过 Pathfinder 软件计算；建植后阶段，碳排放主要来自养护管理活动，故采用排放因子法[18]（活动数据乘以排放因子），得到大气碳排库的碳排放量为两者之和。

2.4　数据分析

通过 Microsoft Excel 2010 整理数据并绘制统计图；运用 SPSS 27.0 作相关性分析。

3　结果与分析

3.1　城市绿地碳库量化

3.1.1　城市绿地碳库碳汇碳排放量化及分区

表 2 显示，由于研究场地建成时间不同，秦陌花塘区碳汇量为 72.44 t；林灌区碳汇量为 109.24 t，共 181.68 t。碳排放呈阶段性特征：建植前期受建材类型、运输距离及施工工艺直接影响碳排放，后期因运维产生持续性碳排

放。林灌区已达碳中和，成为碳汇库；秦陌花塘区碳排放量为 2848.24 t，是碳排库，预计 16 年后达到碳中和，由碳排库变为碳汇库（图 2）。

表 2 研究场地碳排碳汇

测算量	核算项目		分区计算		
碳排放量/t	阶段	材料及人为活动	秦陌花塘(面积 6.34 hm^2)	林灌区(面积 6.58 hm^2)	场地现状(面积 12.92 hm^2)
	建植前阶段	铺装与建筑	1 553.73	630.37	2 834.29
		构筑物与小品	97.19	11.65	
		养管设施	2.49	1.15	
		地形[19]	281.38	0.00	
		种苗生产运输	899.50	294.60	
	建植后阶段	养护管理活动	13.95	13.73	13.95
	共计		2 848.24	951.50	2 848.24
碳汇量/t	地被型绿地		48.65	10.01	58.67
	灌地型绿地		6.70	11.04	17.73
	林地型绿地		17.09	88.18	105.28
	共计		72.44	109.24	181.68
碳中和年限/年			39.32	8.71(已达碳中和)	15.68

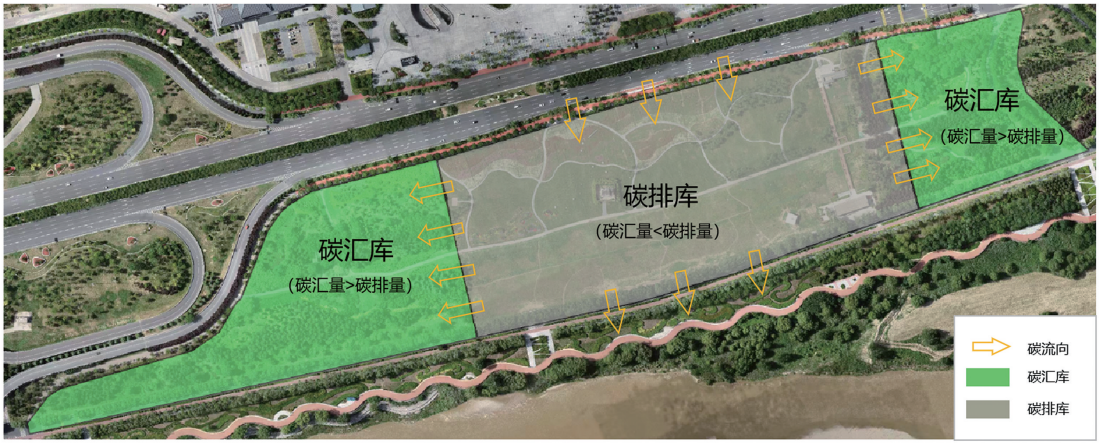


图 2 场地绿地碳库分区

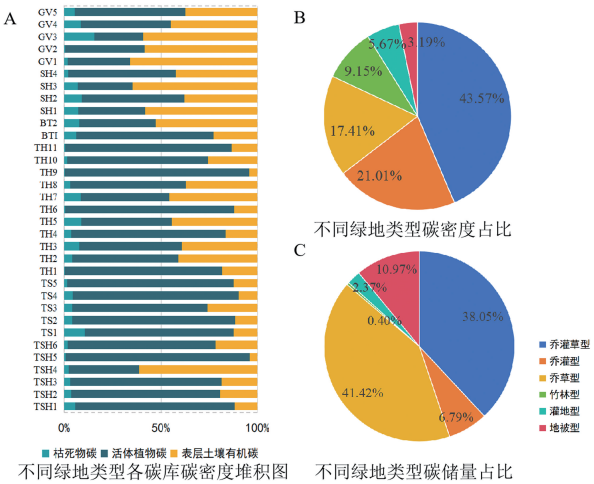
3.1.2 不同绿地类型碳储量

不同绿地的植物、土壤碳储对碳库容量的贡献率不同（图 3A）。研究场地碳储量为 1 652.17 t（表 3），排序为乔草型>乔灌草型>地被型>乔灌型>灌地型>竹林型（图 3C）。研究场地总碳库平均碳密度为 12.79 kg·m^{-2}，排序为乔灌草型>乔灌型>乔草型>竹林型>灌地型>地被型（图 3B）；植物碳密度大于表层土壤有机碳密度（表 3）。碳库指数除地被型绿地外均>1，表明经长期演替的林灌植被呈有机质积累特征，而新建区因翻土等不合理管理措施导致有机质流失。

3.2 城市绿地碳库碳储碳汇影响要素

3.2.1 植物影响要素

由表 4 可知，绿地碳储量与植物碳储量、乔灌碳储量均呈极显著（$P<0.01$）正相关，绿地碳汇量与乔灌碳汇量极显著相关（$P<0.01$），说明植物碳汇具有主导地位。



不同绿地类型各碳库碳密度堆积图　不同绿地类型碳密度占比　不同绿地类型碳储量占比

注：乔木层（tree，T）、灌木层（shrub，S）、草本层（herb，H），乔灌草型（TSH）、乔灌型（TS）、乔草型（TH）、灌地型（SH）、地被型（ground cover，GV）。

图 3 绿地碳密度与碳储量

表 3　不同绿地碳密度、碳储量与碳库指数

碳库类型	林地型	灌地型	地被型	均值
植物碳密度/（kg·m^{-2}）	16.59	4.84	2.76	8.07
表层土壤有机碳密度/（kg·m^{-2}）	2.24	2.34	1.47	2.02
土壤微生物量碳密度/（kg·m^{-2}）	0.037	0.028	0.025	0.03
总碳库碳密度/（kg·m^{-2}）	18.83	7.18	4.23	12.79
碳库指数	1.295	1.38	0.87	1.18
碳储量/t	1 437.59	39.32	175.26	

表 4　绿地碳储量、碳汇量与总量的相关性

	碳排放量	植物碳储量	土壤有机碳	微生物量碳	枯死物碳	地被固碳量	乔灌碳储量	乔灌碳汇量
绿地碳储量	−0.098	0.997**	0.271	0.318	0.134	−0.202	0.996**	0.133
绿地碳汇量	0.029	0.134	−0.011	0.074	0.274	0.024	0.126	0.926**

注：** 表明 $P<0.01$，差异极显著。

由表 5～6 可知，植物个体的固碳能力差异大：高固碳地被植物有苏门白酒草、苦苣菜、花叶滇苦菜等；高固碳树种有雪松、国槐、臭椿等；银杏、油松、黑松等慢生树种年固碳量低；火棘、石楠、蔷薇等分散种植大灌木固碳能力强；紫叶小檗、小叶女贞等中小灌木绿篱固碳能力弱。

表 5　地被植物单位叶面积日固碳量　　g

植物名称	日固碳量	植物名称	日固碳量
苏门白酒草 *Erigeron sumatrensis*	12.89	阿拉伯婆婆纳 *Veronica persica*	4.66
苦苣菜 *Sonchus oleraceus*	12.42	稗 *Echinochloa crusgalli*	4.12
花叶滇苦菜 *Sonchus asper*	8.99	黄香草木樨 *Melilotus officinalis*	4.09
芦苇 *Phragmites australis*	6.67	狗尾草 *Setaria viridis*	3.93
鸢尾 *Iris tectorum*	5.75	宿根天人菊 *Gaillardia aristata*	3.24
松果菊 *Echinacea purpurea*	5.45	扁穗雀麦 *Bromus catharticus*	2.81
小蓬草 *Conyza canadensis*	5.38	拂子茅 *Calamagrostis epigeios*	2.57
野艾蒿 *Artemisia lavandulaefolia*	4.98	早熟禾 *Poa annua*	2.42

表 6　单株乔灌木年固碳量　　kg

植物名称	年固碳量	植物名称	年固碳量
乔木			
银杏 *Ginkgo biloba*	1.6	樱花 *Prunus serrulata*	5.3
女贞 *Ligustrum lucidum*	2.5	馒头柳 *Salix matsudana* ‘*Umbraculifera*’	5.5
黑松 *Pinus thunbergii*	2.8	雪松 *Cedrus deodara*	10.5
油松 *Pinus tabuliformis*	3.6	国槐 *Styphnolobium japonicum*	15.4
梓 *Catalpa ovata*	4.6	臭椿 *Ailanthus altissima*	19.3
紫叶李 *Prunus cerasifera*	4.9		
灌木			
紫叶小檗 *Berberis thunbergii*	0.2	蔷薇 *Rosa multiflora*	1.7
小叶女贞 *Ligustrum quihoui*	0.3	石楠 *Photinia serratifolia*	5.2
黄刺玫 *Rosa xanthina*	0.6	火棘 *Pyracantha fortuneana*	5.8
月季花 *Rosa chinensis*	0.7		

植物群落方面，通过与绿地碳储量和碳汇量相关性分析（表 7）可知，乔木胸径（乔灌草型、乔草型）与碳储量极显著（$P<0.01$）正相关，表明胸径越大，木质部生物量越多且分解慢[20]，形成稳定碳库；乔灌型绿地灌木密度与碳汇量显著（$P<0.05$）正相关。灌木通过两种方式增强碳汇：高密度灌木通过枝叶和根系快速固碳；灌木层连接乔-草，减少土壤侵蚀、调节微气候，间接提升整体碳汇效益。灌木物种数（灌地型）与碳储量呈显著（$P<0.05$）正相关，表明物种数增加可通过生态位互补或凋落物多样性驱动土壤碳积累提升碳储量[21]。地被型绿地草本叶面积与碳汇量显著（$P<0.05$）正相关，乔草型绿地草本叶面积与碳汇量呈极显著（$P<0.01$）正相关，体现其快速光合固碳能力；草本密度（乔灌草型）与碳储量的极显著（$P<0.01$）正相关，表明草本植物密度增加有利于土壤碳库的积累[22]。

表 7 绿地碳库碳储量、碳汇量与群落指标相关性

绿地类型	乔灌草型			乔灌型	乔草型		灌地型		地被型
群落特征指标	DBH	sPD	hPD	sPD	DBH	hLAI	sSR	sPD	hLAI
城市绿地碳储量	0.970**	−0.075	0.950**	0.911*	0.837**	−0.301	0.975*	0.041	0.001
城市绿地碳汇量	−0.25	0.947**	−0.208	0.919*	−0.054	0.912**	0.015	0.970*	0.982*

注：* 表明 $P<0.05$，差异显著，** 表明 $P<0.01$，差异极显著；物种数目（species richness，SR），密度（plant density，PD），胸径（diameter at breast height，DBH），叶面积指数（leaf area index，LAI）；灌木层群落指标前加“s”，草本层群落指标前加“h”；下同。

3.2.2 土壤影响要素

由表 8 可知：土壤有机碳含量与表层微生物量碳呈极显著正相关（$P<0.01$），表明微生物活动对有机碳积累有关键作用[23]；与土壤容重、含水率显著负相关（$P<0.05$），与土壤密度极显著负相关（$P<0.01$），与毛管持水量、田间持水量显著正相关（$P<0.05$），说明土壤有机碳提升土壤持水能力、优化物理结构（如降低紧实度）的双向反馈机制[24]。

表 8 土壤有机碳含量与土壤性质的相关性

	土壤有机碳	土壤容重	土壤含水率	饱和持水量	毛管持水量	田间持水量	土壤密度
土壤有机碳	1	−0.412*	−0.448*	0.344	0.388*	0.467*	−0.490**
微生物量碳	0.913**	−0.537**	−0.438*	0.477**	0.481**	0.538**	−0.595**

注：* 表明 $P<0.05$，差异显著；** 表明 $P<0.01$，差异极显著；下同。

3.2.3 养护管理影响要素

不同绿地碳排放量与草本层群落特征相关，说明草本植物在碳汇效益提升中的重要作用。由表 9 可知，乔灌草型绿地，碳排放量与乔木密度呈极显著（$P<0.01$）正相关；灌地型绿地的碳排放量草本植物密度和叶面积指数呈显著（$P<0.05$）负相关，与灌木高度呈极显著（$P<0.01$）负相关，三者反映植物长势与碳排放量的关系。因此，高密度乔木种植会加剧碳排放；低矮植被（地被、灌草）通过物理覆盖和微气候调节展现强减排潜力[25-26]。

表 9 绿地养护管理碳排放量与群落特征指标的相关性

绿地类型	乔灌草型		乔草型	灌地型			地被型
群落指标	tPD	hCD	hH	sH	hPD	hLAI	hCD
碳排放量	0.986**	−0.830*	0.625*	−0.997**	−0.989*	−0.986*	−0.944*

注：盖度（cover degree，CD），高度（height，H）；乔木层群落特征指标前加“t”。

对地被型绿地的养护管理措施分析可知，施肥和病虫害防治是产生碳排放量的主要来源，灌溉略有影响（图 4A）。总体上，随着养护强度的增强，碳排放量增大（图 4B），推荐种植混播野花草甸。

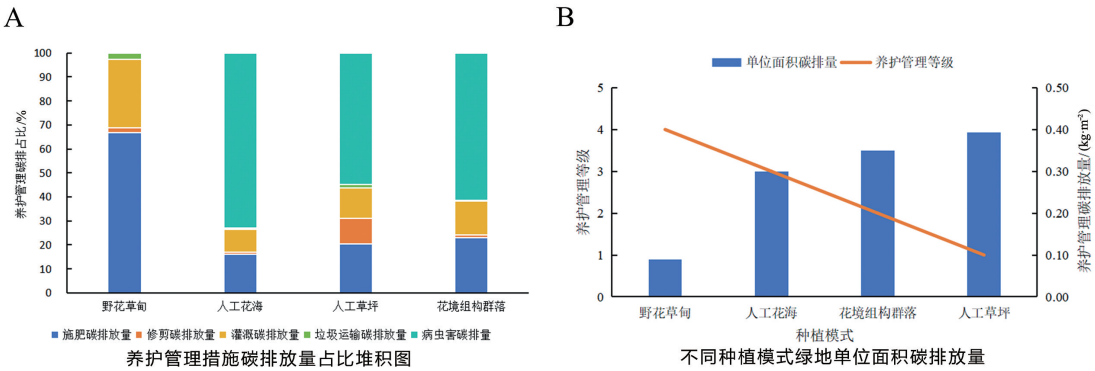


图 4 养护管理措施碳排放量统计

4　城市绿地碳库构建与碳汇效益提升策略

4.1　全生命周期城市绿地减排策略

大气碳排库可通过就地取材措施减少运输碳排放；使用再生材料、生态材料、利用地形减少对原生境的破坏，避免碳损失；建植后阶段，建议种植适应性强的植物，促进自然演替（表 10）。

4.2　城市绿地植物与土壤碳汇效益提升策略

植物和土壤是关键碳汇库：乔灌木的固碳能力与其年龄、规格、生长速度相关，应注重保护古树、大树，也可直接选择高固碳植物。林地型绿地中乔木胸径、灌木密度、草本 LAI 是调控碳储/汇的三大“杠杆参数”，建议种植“大乔木+高密度草本”模式（乔草型）；乔灌草型绿地碳汇量更高。灌地型绿地以物种多样性保障碳库稳定性，以密度调控激活碳汇效率，形成“多物种-中密度”的稳健模式。地被型绿地高 LAI 需配合科学管理以维持高生产力。草本层对不同绿地都发挥着积极影响，应注重高固碳地被群落的应用。土壤方面，科学翻土施肥改良其理化性质，促进有机碳持续增储（表 10）。

表 10　城市绿地碳库全生命周期提质增效策略

城市绿地碳库		大气碳排库	植物碳汇库	土壤碳汇库	水域碳汇库
建植前阶段	规划设计	以低碳导向设计，预评估场地建设碳汇碳排放量，可通过 pathfinder 计算碳排放数据，选择更环保的材料和设计方案，减少项目碳足迹			
	材料生产运输	就地取材、使用再生材料、生态材料	本地苗源、乡土植物、高固碳植物	保留原土，选择优质客土改良	本地沉水植物、浮水植物和挺水植物
	建植施工	利用地形，避免大规模整地活动	保留原生植物；混播为主，苗播为辅；减少草皮的使用	减少对土壤的破坏	减少对湿地的破坏，恢复退化湿地
建植后阶段	养护管理	低养护，分区分型管理，动态监测	植物自然演替	施用有机肥，增加植被覆盖度	减少工业、农业和生活污水排放
	垃圾处置	就地堆肥			

4.3　场地碳汇分区优化方案

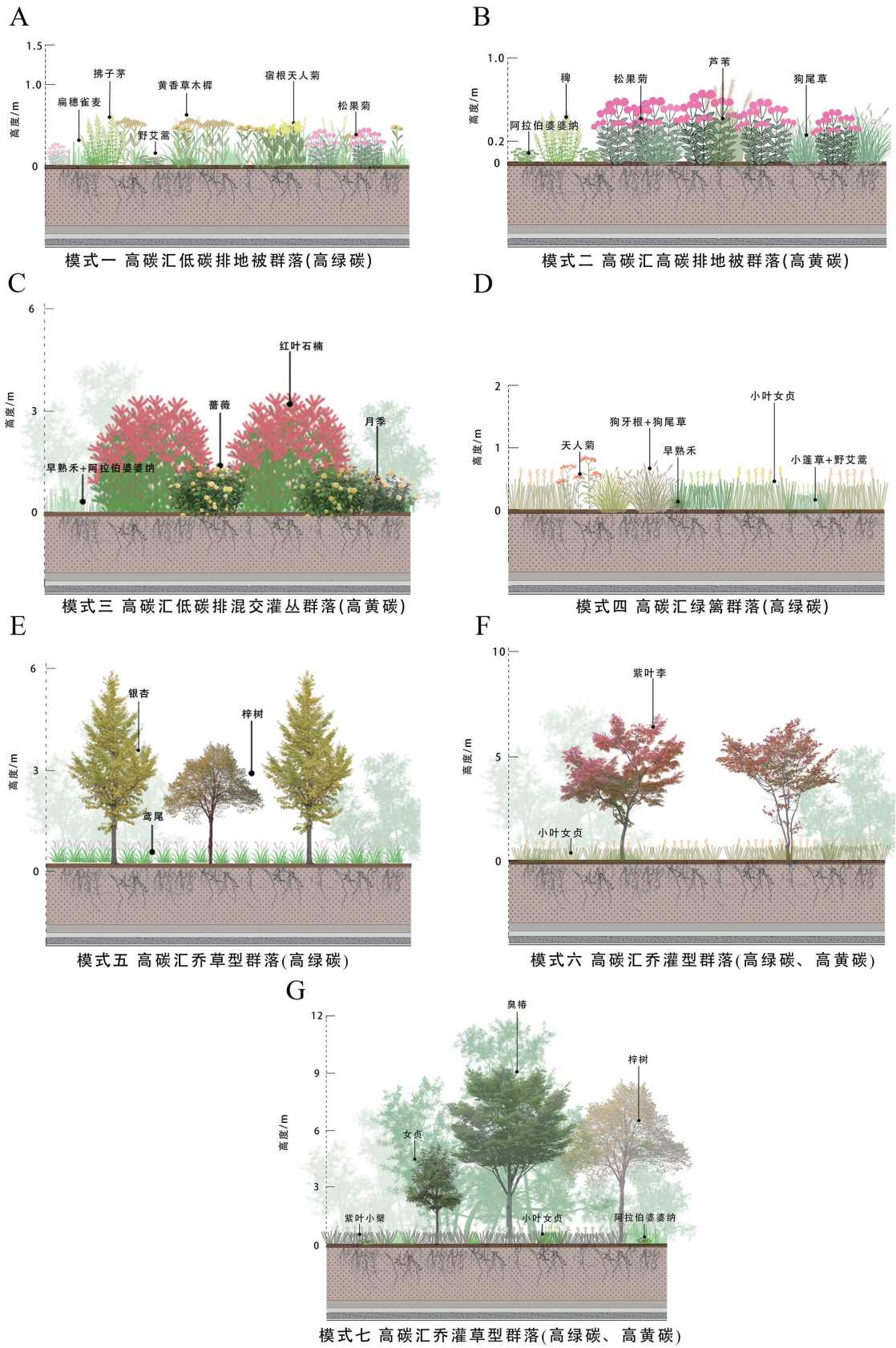
采用“分区分型优化”：在碳汇区以乔灌草复合系统为主，在碳排放区强化地被覆盖，促进绿地系统净碳汇量提升。针对场地碳汇效益薄弱区域，依据高碳汇绿地植物群落模式进行优化（表 11、图 5）：秦陌花塘林地型绿地采用模式五进行优化；栈桥附近灌地型绿地采用模式四进行优化；人工花海区采用模式一进行优化。经模拟计算，该优化方案可使场地碳中和年限缩短 5.13 年、碳储量增加 25.82 t（表 12）。

表 11　高碳汇绿地植物群落模式　　kg · m^{-2}

绿地类型	群落模式	植物群落组构	碳密度	年固碳量	表层 15cm 土壤有机碳	表层 15cm 土壤微生物量碳	养护管理碳排放量
地被型	一	黄香草木樨+宿根天人菊+扁穗雀麦+松果菊+拂子茅+野艾蒿	4.6	3.44	1.09	0.05	0.09
	二	松果菊+芦苇+稗+狗尾草+阿拉伯婆婆纳	4.05	1.78	2.62	0.02	0.35
灌地型	三	红叶石楠+蔷薇+月季+低矮地被	5.9	1.97	3.18	0.04	0.22
	四	小叶女贞绿篱	5.25	4.39	1.93	0.03	0.25
乔草型	五	银杏+梓树+鸢尾	8.37	4.88	1.33	0.02	0.20
乔灌型	六	紫叶李+小叶女贞	24.27	10.14	3.00	0.05	0.23
乔灌草型	七	梓树+臭椿+女贞+紫叶小檗+小叶女贞+阿拉伯婆婆纳	13.99	3.97	2.58	0.04	0.23

表 12　研究场地绿地增汇减排优化

优化项目	优化区	绿地类型	参考模式	优化前	优化后	变化量
增汇量/t	秦陌花塘	林地型	模式五	34.47	40.22	61.28
	栈桥附近	灌地型	模式四	0.34	0.94	
	人工花海	地被型	模式一	5.06	20.12	
减排量/t	秦陌花塘	地被型	低维护管理	13.95	9.57	4.38
碳中和年限/年	研究场地	全部绿地类型	高碳汇绿地群落模式	15.68	10.55	5.13
绿地碳储量/t				1 652.17	1 677.99	25.82



注：高绿碳指高固碳植物；高黄碳指高土壤碳汇；低碳排指低养护管理碳排放。

图 5 高碳汇绿地植物群落模式

5　结论

本研究基于全生命周期法对碳库的碳汇量与碳储量进行了系统核算。通过案例分析量化了 3 种绿地碳库，揭示了城市绿地碳库主要由植物碳库和土壤碳库组成。绿地建成初期为碳排库，由于植物碳汇作用，逐渐变碳汇库。城市绿地碳库碳储量受植物、土壤和养护管理等 3 方面要素影响。其中，植物要素为影响碳储量和碳汇量的主导因素；土壤有机碳与微生物量碳密切相关；养护管理产生碳排放量，为间接影响因素。绿地需进行系统性增汇减排，尤其是高固碳植物的选择与高碳汇绿地植物群落模式的应用。本研究分阶段分类型的碳汇测算方法可指导绿地规划从“碳排库”向“碳汇库”转型，为绿地碳汇效益的提质增效提供指导方法与路径。

致谢：感谢西安建筑科技大学在读硕士研究生李佳欣、西北农林科技大学在读硕士研究生李悦、张雅欣对样地调查的帮助。

参考文献

[1] BIGLER C, BRÄKER O U, BUGMANN H, et al. Drought as an inciting mortality factor in Scots pine stands of the Valais, Switzerland[J]. Ecosystems, 2006, 9(3): 330-343.

[2] IPCC. Climate change 2023: synthesis report[R]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023.

[3] 朴世龙，岳超，丁金枝，等. 试论陆地生态系统碳汇在“碳中和”目标中的作用[J]. 中国科学：地球科学，2022，52(7)：1419-1426.

[4] 米志付，张浩然. IPCC AR6 WGIII 报告解读：城市系统减缓气候变化[J]. 气候变化研究进展，2023，19(2)：139-150.

[5] 石铁矛，王迪，汤煜，等. 城市生态系统碳汇固碳能力计算方法与影响因素研究进展[J]. 应用生态学报，2023，34(2)：555-565.

[6] 李沛颖. “碳中和”导向下的城市生态系统碳汇效能研究[J]. 世界建筑，2024(11)：16-17.

[7] 余春华. 提高碳汇效益的城市绿地种植设计研究：以南京林业大学附属绿地为例[D]. 南京：南京林业大学，2023.

[8] 郭婷婷. 碳中和视角下公园绿地植物群落优化：以杭州西湖风景名胜区为例[D]. 杭州：浙江农林大学，2023.

[9] 唐佳佳. 基于 LiDAR 点云和高光谱影像的植被碳汇提升引导方法[D]. 徐州：中国矿业大学，2023.

[10] 李隽永. 基于土壤固碳能力的城市公园下垫面设计研究[D]. 长沙：湖南农业大学，2017.

[11] 江佩宜，戴菲. 城市绿地碳汇测算方法研究进展[J]. 中国城市林业，2024，22(1)：87-93.

[12] CHEN C D, WANG R B, CHEN M K, et al. The post-effects of landscape practices on spontaneous plants in urban parks[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2025, 107: 128744.

[13] STROHBACH M W, ARNOLD E, HAASE D. The carbon footprint of urban green space: alife cycle approach[J]. Landscape and Urban Planning, 2012, 104(2): 220-229.

[14] 许博文，刘晖，王晶懋，等. 基于生境及其植被特征的西北干旱半干旱区城市绿地生态设计途径[J]. 风景园林，2024，31(6)：12-18.

[15] 王晶懋，徐浩博，张涛，等. 中国西北地区城市低碳生态公园设计流程与途径研究[J]. 风景园林，2025，32(7)：132-140.

[16] 王智远，李晓华，吴馨璨，等. 全生命周期下农村土地整治碳核算及低碳整治策略[J]. 乡村科技，2023，14(17)：125-130.

[17] 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.

[18] 赵玥，王洪成，赵迪. 不同类型城市绿地植被碳收支差异研究：以天津市市内六区为例[J]. 景观设计，2024(2)：22-25.

[19] 程韵琦. 土地整治项目碳效应测算及决策优化研究：以乐平市众埠镇项目区为例[D]. 南昌：江西财经大学，2020.

[20] 吕明和，周国逸，张德强. 鼎湖山黄果厚壳桂粗死木质残体的分解[J]. 广西植物，2006，26(5)：523-529.

[21] CHEN X L, TAYLOR A R, REICH P B, et al. Tree diversity increases decadal forest soil carbon and nitrogen accrual[J]. Nature, 2023, 618(7963): 94-101.

[22] 蒋星驰，温苏雅勒图，李俊瑶，等. 基于 SHAP 值方法的乌拉特梭梭(Haloxylon ammodendron)林保护区土壤表层碳氮储量及其影响因素研究[J]. 中国沙漠，2023，43(2)：170-183.

[23] TAO F, HUANG YY, HUNGATE B A, et al. Microbial carbon use efficiency promotes global soil carbon storage[J]. Nature, 2023, 618(7967): 981-985.

[24] WANG D Y, LIN J Y, SAYRE J M, et al. Compost amendment maintains soil structure and carbon storage by increasing available carbon and microbial biomass in agricultural soil - A six-year field study[J]. Geoderma, 2022, 427: 116117.

[25] SONG J, WAN S Q, ZHANG K S, et al. Ecological restoration enhances dryland carbon stock by reducing surface soil carbon loss due to wind erosion[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2024, 121(46): e2416281121.

[26] 商茹，李嘉乐，李薇，等. 北京城市绿地不同下垫面对环境微气候影响研究[J]. 中国农学通报，2019，35(22)：77-83.