水绿协同作用下的城市滨水绿地固碳效能*

袁旸洋[1,2] 罗尚岑[1] 杨明珠[1] 黄韬睿[1] 姚思丹[1] 毛婧雯[1] 洪仟雨[1]

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

摘要:【目的】探究水绿协同作用对绿地固碳效能的影响,为实现以高碳汇为目标的城市滨水绿地规划设计与更新提供数据支持与理论参考。【方法】以南京秦淮新河两侧滨水绿地为研究对象,首先采用实测与遥感技术结合的方法计算绿地固碳效率;然后构建水绿空间关系指标因子体系,采用机器学习的随机森林方法识别关键影响因子;最后通过建立 16 个情景模型,对关键影响因子进行模拟验证。【结果】1)滨水绿地固碳效率高于非滨水绿地;2)10、10~20 m 林地面积占比对滨水绿地固碳能力具有较高影响,即绿地与水的距离越近固碳能力越好;3)滨水区域设计中,距水岸 10 m 内应以绿地为主,提升岸线复杂度并尽量增加绿地纵深;4)宜选用高碳汇、耐水湿乔灌木在绿地中均衡分布栽植,避免条带状种植。【结论】研究证实了水绿在固碳效益上的协同作用,所识别的影响固碳的水绿空间关系指标可为高碳汇下城市滨水绿地规划设计与更新提供数据支持与理论参考。未来研究可提升植物固碳效率测算的精确度,并在时间尺度和应用场景上拓展研究的深度和丰富度。

关键词:蓝绿空间;滨水绿地;碳汇效能;随机森林回归模型;情景模拟
DOI:10.12169/zgcsly.2025.04.09.0001

Carbon Sequestration Efficiency of Urban Waterfront Green Spaces under Water-Green Synergy

Yuan Yangyang[1,2] Luo Shangcen[1] Yang Mingzhu[1] Huang Taorui[1] Yao Sidan[1]
MaoJingwen[1] Hong Qianyu[1]

(1. School of Architecture, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Jiangsu Provincial Urban and Rural Digital Technology Engineering Center, Nanjing 210096 , China)

Abstract:【Objective】To explore the impact of water-green synergy on the carbon sequestration efficiency of green spaces and provide data support and theoretical references for the planning, design, and renewal of urban waterfront green spaces with high carbon sink.【Method】Taking the waterfront green spaces on both sides of the Qinhuai New River in Nanjing as the object, this study first calculates the carbon sequestration efficiency of green spaces by combining field measurements with remote sensing technology, then constructs an index factor system for water-green spatial relationships and identifies key influencing factors using the random forest algorithm in machine learning, and finally establishes 16 scenario models to simulate and validate the key influencing factors.【Result】1) The carbon sequestration efficiency of waterfront green spaces is higher than that of non-waterfront green spaces; 2) The proportion of forest land within 10 m and 10-20 m from the water has a high impact on the carbon sequestration capacity of waterfront green spaces, indicating that the closer the green space is to water, the

收稿日期:2025-04-09
* 基金项目:国家自然科学基金重点项目(51838003);东南大学“至善青年学者”支持计划(2242023R4002)
第一作者/通信作者:袁旸洋(1987-),女,博士,副教授,硕士生导师,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。E-mail:yyy@seu.edu.cn

stronger its carbon sequestration capacity; 3) In the design of waterfront areas, green spaces should be prioritized within 10 m to the water, in which shoreline complexity should be enhanced and green space depth should be maximized as much as possible; and 4) high-carbon-sink and water-tolerant trees and shrubs should be evenly distributed in green spaces, avoiding strip planting. 【Conclusion】 This study confirms the synergistic effect of water and green spaces on carbon sequestration benefits, and the identified water-green spatial relationship indicators affecting carbon sequestration can provide data support and theoretical references for planning, design, and renewal of urban waterfront green spaces under high carbon sink objectives. Future research can improve the accuracy of plant carbon sequestration efficiency calculations and expand the depth and richness of research in terms of temporal scales and application scenarios.

Keywords: blue-green space; waterfront green spaces; carbon sequestration efficiency; random forest regression model; scenario simulation

二氧化碳（Carbon dioxide, CO_2）等温室气体排放导致的全球变暖是当下最为突出的气候变化问题。城市碳排放量占总碳排放量的 70% 以上[1]，城市的减碳增汇受到国内外学者们的普遍关注。蓝绿空间是城市发展过程中留存或新建的绿色和蓝色空间总和，也是城市碳汇的载体。如何提升高密度城市中蓝绿空间的碳汇效能，成为重要的研究课题。过往研究中，学者们分别对蓝色和绿色空间的固碳（Carbon sequestration）进行探讨。绿色空间是碳汇贡献者，规模、植被覆盖度和植物类型等均会影响绿地固碳能力[2]，学者们多采用软件气候模拟、实测计算的方法证明植物群落平均胸径、冠幅等对固碳效益有较大影响[3]。与绿色空间不同，蓝色空间固碳的相关研究主要侧重于大尺度的流域、海岸、湿地等生态环境[4-8]，研究多围绕碳储展开[9-10]。

城市蓝绿空间（Urban blue-green space, UBGS）作为一个复杂的生态系统，水体与绿地在生态效益的发挥上具有协同效应[11]。近年来，蓝绿空间整体效能及水绿协同作用愈加受到重视[12]，在固碳方面关注两类研究：一是在城市尺度上识别蓝绿空间格局，探讨其与固碳效益之间的关联[13-14]，通过优化水绿空间配置关系提升蓝绿空间固碳效率[15]；二是在中小尺度城市开放空间中，结合实测与模拟探寻蓝绿空间关系、植物群落特征对固碳效益的影响[16]。但是，城市尺度的研究难以准确探究蓝绿空间的协同作用机制，而中小尺度的相关研究多聚焦种植密度、平均胸径等近岸植被群落特征与固碳效益的关联，对绿地、水体两者空间关系的探讨较少。

滨水绿地作为一类常见且典型的城市蓝绿空间，是水绿协同作用较为显著的区域[17]。具体而言，水体具有较大的比热容、较低的导热率和较强的水分蒸发能力，能够存储更多的热量，并可以降低感热交换，增大潜热交换。此外，水体与陆地的温度差造成了湖陆风环流，增加了水体区域的平均风速[18]。以上水体所具有的特性能较好改善近岸环境的温湿度条件，促进植被生长[19-20]，提升植物光合作用能力，从而增加绿地的固碳效能。已有研究发现，水体与绿地面积比[21]、距离[22]等几何形态指标对水绿协同作用存在一定的影响，但针对水绿空间关系在协同固碳中作用机制的研究仍不足。

综上，本研究以南京秦淮新河为案例，选取河道两侧 120 m 范围内的绿地进行研究，目的在于：1）通过滨水与非滨水绿地固碳量的计算，明确水体是否对绿地固碳效能产生积极影响；2）识别水绿空间关系中影响绿地固碳效能的关键因子；3）提出以增汇为目标的城市滨水绿地优化策略，以期为城市滨水绿地更新及以高碳汇为目标的规划设计提供数据支持与优化路径参考。

1　研究区概况

南京市（31°14′—32°37′N，118°22′—119°14′E）位于中国东部、长江下游中部地区，属北亚热带湿润气候，四季分明，雨水充沛。年平均降水量 1 106.5 mm，年平均温度 15.4 ℃。南京的水域面积达 11%以上，有秦淮河、金川河等大小河流湖泊 120 条。秦淮新河流经江宁区和雨花台区，是开挖于 1980 年的人工河道，全长 16.88 km，起于

江宁河定桥，止于大胜关汇入长江，集行洪、灌溉和航运功能于一体。本研究以秦淮新河为案例，研究范围为总长 16 458.43 m 的河定桥至天后大桥段，以及两岸 120 m 以内区域。以道路为界限划分研究区绿地，因面积在 10 hm^2 以下的中小尺度绿地特征研究受尺度影响较小且结果较为一致[23]，筛选出绿地样地共 184 处，面积范围为 0.013~6.968 hm^2。根据绿地与水体是否直接接触，将绿地划分为滨水和非滨水两类，其中滨水绿地 39 处，非滨水绿地 145 处。

2 研究方法

2.1 数据获取和处理

数据包括遥感和实测两个部分。遥感数据为 2023 年 10 月 13 日 0.75 m 空间分辨率吉林卫星数据影像（http://wxzx.jsgs.com.cn:8081/web/home）。经处理后获得归一化植被指数数据（Normalized Difference Vegetation Index，NDVI）、土地利用数据。

实测部分涉及叶面积指数（Leaf Area Index，LAI）数据、乔灌木调查数据。因草地等低矮地被的年度碳汇效益较微弱[24]，本研究主要计算乔木、灌木固碳。首先，根据土地利用数据确定绿地中林地范围，随机选点作为 LAI 实测与乔灌木调查样点（图 1）。以点为几何中心构建 10 m×10 m 样方。LAI 样方数量 30 个[25]，乔灌木调查按每公顷林地 100 m^2 样方计算[26]，共设置样方 200 个。实测调查于 2023 年 9—10 月份进行。在 LAI 实测中，利用植物冠层分析仪（24MP DSLR Compact OMount）对每个样方进行 4 次 LAI 测量，取平均值作为样方的 LAI 值；在乔灌木植物调查中统计样方中乔灌木种类及数量。

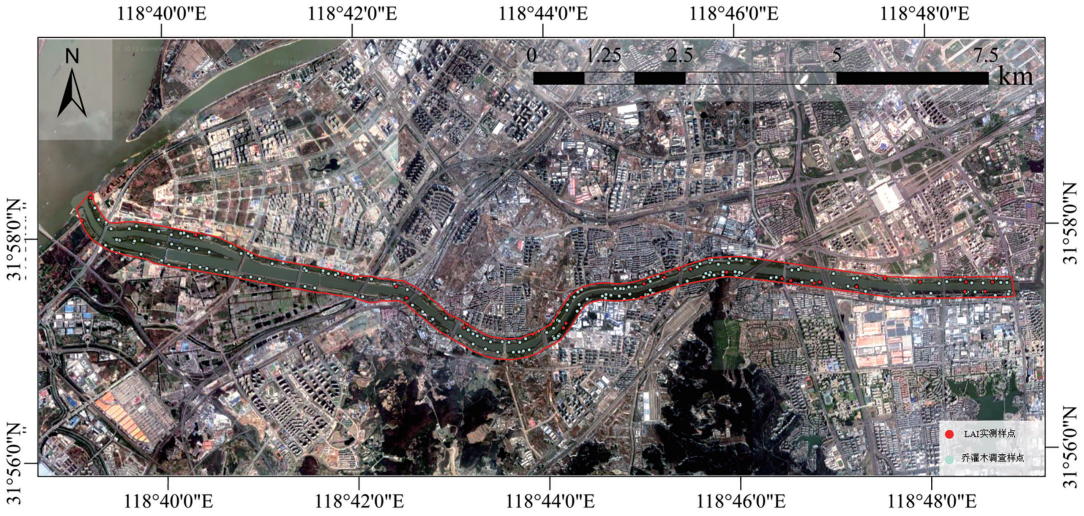


图 1 LAI 实测样点与乔灌木调查样点分布

2.2 固碳效率计算

在 SPSS 23.0 软件中采用 Pearson 回归分析，建立实测样方 LAI 值与遥感图像 NDVI 值的回归方程。反演得到研究区 LAI 数据后，根据范围提取各绿地 LAI 数据。基于乔灌木调查数据，取频度大于 6.2%的乔灌木为常见类型[27]。参考与案例所属气候条件相近区域的研究结果[28]（表 1），取均值作为常见乔灌木单位叶面积固碳效率。经计算，常见乔木的平均单位叶面积固碳效率为 9.848 $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$，常见灌木的为 13.675 $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$。

绿地固碳效率计算公式如下：

$$C = \sum_{i=1}^{i} \frac{y_{乔} \times c_{乔} \times s_{乔} + y_{灌} \times c_{灌} \times s_{灌}}{s_{乔} + s_{灌}} \quad (1)$$

式（1）中：C 为绿地固碳效率（$g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$）；$y$ 为第 i 块绿地中乔木或灌木的 LAI 值；c 为常见乔木或灌木平均单位叶面积固碳效率（$g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$）；$s$ 为第 i 块绿地中乔木或灌木面积。

2.3 关键因子识别

选取影响绿地固碳效能的因子，构建水绿空间关系指标，共包括 5 个（表 2）。其中，水绿接触比（R）、水绿宽度比（W）2 个指标表征绿地与水体的形态关系；10 m 林地面积占比（P10）、10~20 m 林地面积占比（P20）、20~30 m 林地面

积占比（P30）3 个指标用于描述绿地中林地距水岸的分布情况（图 2）。采用机器学习的随机森林回归模型[29]对水绿空间关系指标进行重要性分析。以绿地固碳效率 C 为因变量，各个指标数据为特征变量。使用粒子群算法优化，并加入五折交叉验证防止过拟合情况。通过 R^2 与平均绝对误差（Mean Absolute Error）检验模型精度，将 R^2 大于 0.7 作为模型通过精度验证的必要条件。

表 1　常见乔灌木单位叶面积固碳效率

植物类型	植物品种	频度/%	单位叶面积固碳效率/（g·m^{-2}·d^{-1}）	平均单位叶面积固碳效率/（g·m^{-2}·d^{-1}）
乔木	樟树（*Cinnamomum camphora*）	29.24	11.88	9.848
	女贞（*Ligustrum lucidum*）	16.96	12.12	
	垂柳（*Salix babylonica*）	8.77	12.58	
	榉树（*Zelkova serrata*）	8.77	9.59	
	紫薇（*Lagerstroemia indica*）	7.02	7.88	
	银杏（*Ginkgo biloba*）	6.43	5.04	
灌木	红叶石楠（*Photinia × fraseri*）	20.47	12.98	13.675
	海桐（*Pittoaporum tobira*）	11.70	26.51	
	女贞（*Ligustrum lucidum*）	9.94	15.18	
	红花檵木（*Loropetalum chinense* var. *rubrum*）	7.02	8.34	
	六道木（*Zabelia biflora*）	6.43	7.38	
	杜鹃（*Rhododendron simsii*）	6.43	11.66	

注：表中数据引用自董延梅[28]的研究。

表 2　水绿空间关系指标

指标	计算公式	
水绿接触比	$R_i=\frac{L_i}{P_i}$	R_i 为第 i 个绿地的水绿接触比；L_i 为第 i 个绿地的岸线长度；P_i 为第 i 个绿地周长
水绿宽度比	$W_i=\frac{W_G_i}{W_R_i}$	W_i 为第 i 个绿地的水绿宽度比；W_R_i 为绿地对应河段的平均宽度；W_G_i 为绿地的平均宽度
10 m 林地面积占比	$P10_i=\frac{a10_i}{A_i}$	$P10_i$ 为第 i 个绿地距岸线 10 m 距离林地面积与绿地总面积的比值；$a10_i$ 为距岸线 10 m 距离林地面积；A_i 为第 i 个绿地总面积
10~20 m 林地面积占比	$P20_i=\frac{a20_i}{A_i}$	$P20_i$ 为第 i 个绿地距岸线 10~20 m 距离林地面积与绿地总面积的比值；$a20_i$ 为距岸 20~30m 距离内第 i 个地块绿地林地面积；A_i 为第 i 个地块绿地林地总面积
20~30 m 林地面积占比	$P30_i=\frac{a30_i}{A_i}$	$P30_i$ 为第 i 个绿地距岸线 20~30 m 距离林地面积与绿地总面积的比值；$a30_i$ 为距岸 20~30m 距离内第 i 个绿地林地面积；A_i 为第 i 个地块绿地林地总面积

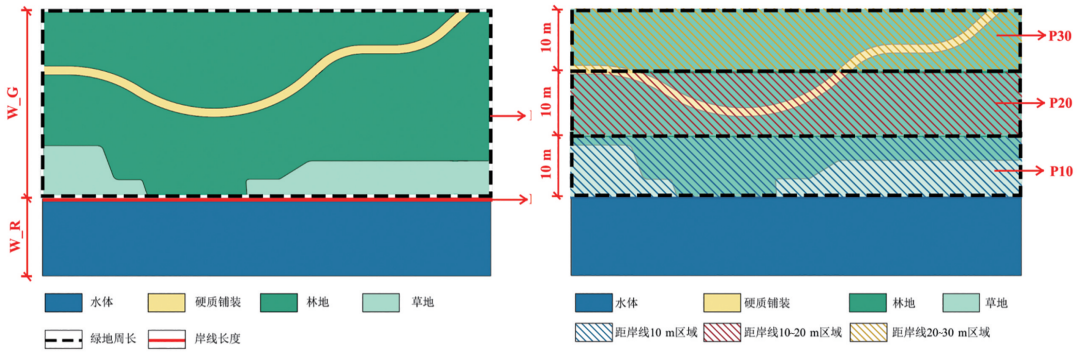


图 2　水绿空间关系指标图示

2.4　情景模拟验证

在识别关键影响因子后，通过构建 16 个情景模型，模拟验证识别结果。采用 Grasshopper 软件搭建情景模型，运用 Morpho 电池组联动 Envi-met 软件进行模拟（图 3）。运用 Envi-met 软件中的“DB Manager”和“Albero”模块配置乔木参数，设置树高度为 7 m，冠幅为 5 m。将场地分割为 5 m×5 m 网格，取各网格的中心为种植点位。根据 Jiang 等[22]的研究，一天内 10：00—11：00 时段植物固碳效率最高且差异明显。因此，模拟各情景 10 天在 10：00—11：00 时间段的 CO_2 浓度。在“Morpho Main Setting”中输入模拟时间段 2023

年 10 月 6—15 日共 10 天的气象数据，数据来源为欧洲中期天气中心（https://cds.climate.copernicus.eu/datasets）。设置每天模拟的初始 CO_2 浓度为 400 ppm（400×10^6）。概化模型单元划分为 5 m×5 m 网格，林地面积占绿地面积的 33%，相关参数如图 4 所示。通过概化模型单元的数量及排布变化，共设置 16 种情景：第一种情景类型反映水绿形态关系，其中包括 3 种水绿宽度比变化情景、3 种水绿接触比变化情景（表 3）；第二种为反映林地分布变化的 10 种情景（表 4）。

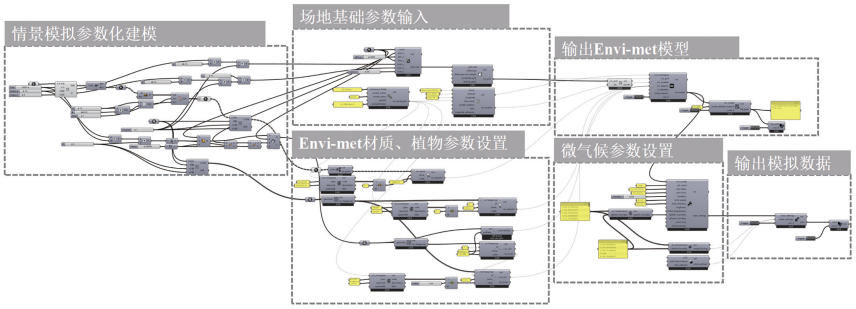
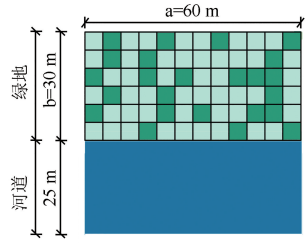


图 3 情景参数化建模及模拟流程



注：a 为滨水绿地长度，b 为滨水绿地宽度。

图 4 概化模型单元

表 3 水绿形态关系情景设置

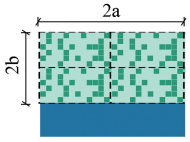
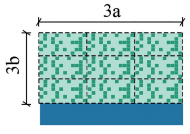
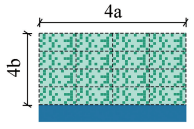
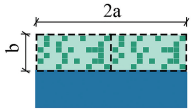
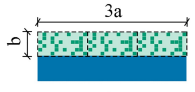
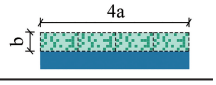
类型	情景	水绿宽度比	水绿接触比	情景示意
水绿宽度比	1	2.4	0.33	
	2	3.6	0.33	
	3	4.8	0.33	
水绿接触比	4	1.2	0.40	
	5	1.2	0.42	
	6	1.2	0.44	

表 4 林地分布变化情景设置

类型	情景	10 m 林地面积占比	10~20 m 林地面积占比	20~30 m 林地面积占比	情景示意
10、10~20、20~30 m 林地面积占比	7	0.33	0.33	0.33	
	8	0	0.33	0.66	
	9	0	0.66	0.33	
	10	0.33	0	0.66	
	11	0.66	0	0.33	
	12	0.66	0.33	0	
	13	0.33	0.66	0	
	14	1	0	0	
	15	0	1	0	
	16	0	0	1	

3　结果与分析

3.1　滨水绿地与非滨水绿地的固碳效率比较

滨水与非滨水绿地固碳效率计算结果如图 5 所示，滨水绿地的固碳效率值高于非滨水绿地。其中，39 块滨水绿地固碳效率的最大值为 24.187 g·m^{-2}·d^{-1}，最小值为 5.051 g·m^{-2}·d^{-1}，均值为 17.04 g·m^{-2}·d^{-1}；145 块非滨水绿地固碳效率的最大值为 23.941 g·m^{-2}·d^{-1}，最小值为 2.123 g·m^{-2}·d^{-1}，均值为 16.15 g·m^{-2}·d^{-1}。这表明水体对沿岸绿地固碳效率的提升具有一定促进作用，这与 Dong 等[30]的研究结果类似。究其原因：一方面在于水体对土壤水份的改善促进了植物生长[31]；另一方面是水体对温湿度、风环境等局部微气候有着显著的优化作用[32]，从而促进植物生长，Jiang 等[22]、卞鸿雁等[33]对绿地固碳效益与微气候的相关性研究中也有相似结果；第三是因为滨水绿地多较为开敞，植物生长的光照条件优于建筑和道路包围的非滨水绿地。

此外，通过绿地固碳效率统计可发现，非滨水绿地样地之间的固碳效率差异较大，而滨水绿地相对稳定。可能是因为水体对两岸的温湿度起到调节作用[34]，使整体微气候环境较为稳定，从而使滨水绿地中植物有较为稳定的光合作用。非滨水绿地大多离水岸较远，紧邻居住区、道路等区域，一天内风向、温湿度、光照微气候环境变化较为剧烈，固碳效率并不稳定。

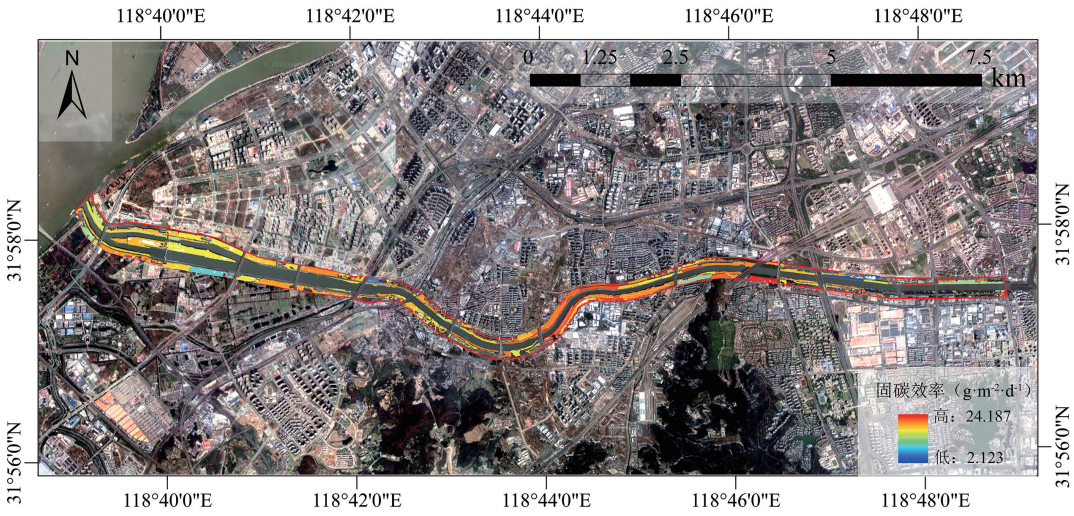


图 5　研究区绿地固碳效率

3.2　影响滨水绿地固碳效能的关键影响因子

随机森林回归模型重要性分析结果的 R^2 为 0.765，MAE 为 1.26，各水绿空间关系指标重要性排序如图 6 所示：P10 重要程度最高，P20，P30、W、R 依次降低，说明提升距河岸 10 m 内绿地中乔灌木面积占比能较好地提升固碳效能。

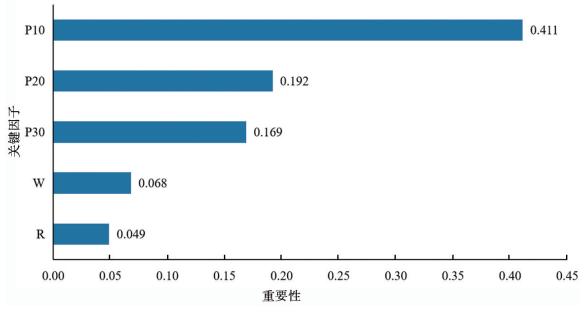


图 6　影响滨水绿地固碳效率的关键因子重要性排序

距河岸 10、10～20、20～30 m 范围对固碳效率的影响呈递减趋势，反映了距离因素对沿水岸植被固碳效率的影响。在以往的大尺度研究中，绿地的面积、斑块类型、景观形状指数、聚集度等空间格局指标与固碳效能多呈显著的相关性[35-36]。但在本研究中，R、W 的影响程度不高，说明中小尺度绿地的形态因素相较于距离关系指标，对固碳效能的影响较弱。

3.3　基于情景模拟的关键影响因子验证

由图 7 可知：情景 1、2、3 中，随着水绿宽度比提升，绿地固碳效益明显呈上升趋势；情景 4、5、6 中，随着水绿接触程度提升，固碳效益也有所增加。这表明合理改变水绿宽度比、水绿接触比均能有效提升滨水绿地的固碳效益。此外，

水绿接触比变化的 3 个情景固碳效益均大于水绿宽度比变化的 3 个情景，说明相较于水绿接触程度，改变水绿宽度比能获得更大的固碳效益。

林地分布变化的 10 个情景中（图 7），固碳效益排前五的依次为：情景 7、情景 11、情景 10、情景 12、情景 13。对比排序在后的 5 种情景，排序在前的 5 种情景满足两个特征：一是 10 m 范围内有林地分布，占比为 0.33 或 0.66；二是距水不同距离的林地占比均小于 1。这与随机森林回归分析结果一致，即 10 m 林地面积占比对滨水绿地固碳效益有较大的影响。固碳效益最好的情景 7 中，10、10～20、20～30 m 林地占比均为 0.33 时，固碳效益最大，说明植物的均衡布置可使绿地获得最高的固碳效益。分析固碳效益排序最后的情景 15、16 可知，10～20 m、20～30 m 林地面积为 1 时固碳效益最小，在一定程度上证明滨水绿地中带状种植的固碳效益较小。这与王一洁等[37]对滨水绿地植物配置的研究结果具有相似性。

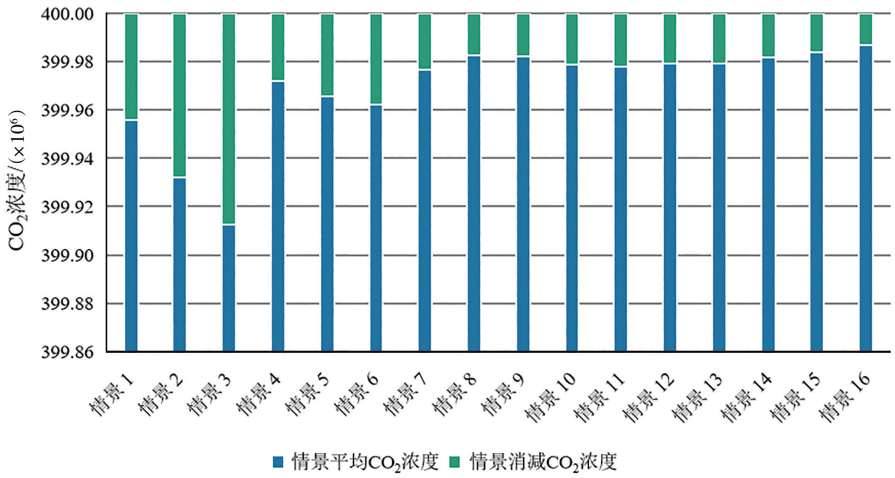


图 7 16 个模拟情景的 CO_2 浓度

4 以固碳效能提升为目标的滨水绿地设计与更新策略

4.1 优先在距水岸 10 m 内近水区域布局林地

研究表明，表征林地分布变化的指标是影响固碳效率的关键因素，其中 10 m 范围内林地占比的重要性尤为突出。因此，在滨水区域的更新中，应着重调整林地分布，优先在距水岸 10 m 内近水区域布局林地，增加耐水湿的高碳汇景观树种，如落羽杉（*Taxodium distichum*）、乌桕（*Triadica sebifera*）、枫杨（*Pterocarya stenoptera*）、垂柳（*Salix babylonica*）等。由于当下城市河道普遍有相应的设防标准及临水堤坝保护要求，在实际建设中需多部门协调实施，如结合近自然河流的建设。在距水岸 10 m 范围内，还应尽量避免布置道路、广场等大面积硬质铺装，以减少人工硬质界面对水绿空间的割裂，为近水区域林地保留充足生态空间（图 8A）。

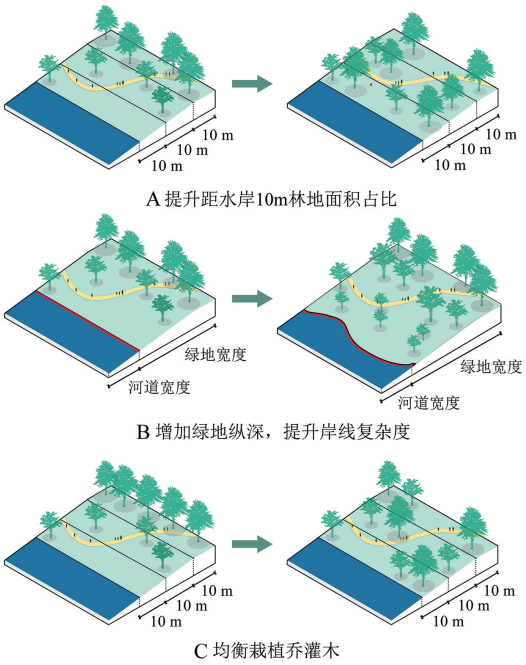
4.2 提升岸线复杂度并尽量增加绿地纵深

模拟结果显示，水绿宽度比增加、接触比提升均会对固碳效能产生较大影响。因此，在滨水区域规划设计时，宜设置大纵深的单个绿地，打造“水生植物-湿生草本-耐湿乔木林”复合型景观，构建多层级植被群落结构。在水绿接触程度的优化方面，尽可能避免直线型水岸，引入自然式、多样化的岸线形态，以增加水体与绿地接触面积。还可设计半岛、水湾、绿洲等多种水陆交接形式，营造层次丰富的水岸景观（图 8B）。

4.3 绿地中均衡分布式栽植乔灌木

研究发现，植物的均衡布置可使绿地获得最高的固碳效能。因而滨水绿地的种植设计需关注乔灌木的分布情况，均衡配置 10、10～20、20～30 m 区域中的乔灌木布局，避免带状种植。应以中、小型乔木及大型花灌木为主，辅以大径级乔木，如选择香樟、水杉（*Metasequoia glyptostroboides*）等固碳能力强的乔木作为上层树种，搭配紫薇（*Lagerstroemia indica*）、木槿（*Hibiscus syriacus*）等花灌木；下层种植麦冬（*Ophiopogon japonicus*）、葱兰（*Zephyranthes candida*）等地被植物，不仅形成丰富的景观空间层次，而

且保证绿地具有高碳汇能力。在城市河道两侧滨水岸线的更新中，可采用乔木区域局部抽稀、两侧拓展的方式，优化行列式、带状种植区域，以提升绿地固碳效能（图 8C）。



A 提升距水岸10m林地面积占比

B 增加绿地纵深，提升岸线复杂度

C 均衡栽植乔灌木

图 8　以固碳效能提升为目标的滨水绿地设计与更新策略

5　结论与展望

研究证实了水绿在固碳效能上的协同作用，丰富了小尺度的蓝绿空间碳汇效益研究；识别了影响固碳的水绿空间关系指标，为城市滨水绿地的优化更新提供数据支持与理论参考，有助于实现以高碳汇为目标的城市滨水绿地规划设计与更新。主要结论如下：1）相较于非滨水绿地，滨水绿地具有更高的固碳效率；2）与水的距离是影响滨水绿地固碳效能的主要因素，其中 10 m 林地占比、10~20 m 林地占比是最关键的 2 个影响因子；3）滨水区域的设计中，距水岸 10 m 内应以绿地为主，提升岸线复杂度并尽量增加绿地纵深；4）宜选用高碳汇、耐水湿乔灌木在绿地中均衡分布栽植，尽量避免条带状种植。

研究尚存在一定的局限性，展望如下：一是在数据精度方面可进一步提高。本研究通过树种调查及 LAI 数据实测，测算植物固碳效率。未来研究中可通过点云数据建立高精度植物模型，根据异速生长方程提升植物固碳效率测算的精确度。二是在时间尺度上拓展研究的深度。研究聚焦于秦淮新河及其两侧滨水绿地和非滨水绿地在夏秋季的固碳效率。而不同季节降雨、温度、日照时长的差异会对植物生长产生影响，进而影响固碳效能。因此，后续可以年份为单位对滨水绿地开展持续性研究，通过长时间尺度的持续观测获得对应不同季节的更完整研究结果。三是在应用场景上提升研究的丰富性。补充城市湖泊等不同滨水场景的研究，扩大水绿协同作用研究的案例丰富度。

参考文献

[1] NATIONS U, AFFAIRS S, DIVISION P. World urbanization prospects: the 2014 revision [EB/OL]. https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/files/documents/2020/Oct/unpd_2014_wup_methodology.pdf.

[2] GHARIBI S, SHAYESTEH K, ATTAIEAN B. The capability of urban green spaces in providing carbon sequestration ecosystem services[J]. Geography and Environmental Sustainability, 2021, 11(3): 61-80.

[3] WANG Y N, CHANG Q, LI X Y. 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.

[4] ZHANG X G, HUANG H S, TU K, et al. Effects of plant community structural characteristics on carbon sequestration in urban green spaces[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 7382.

[5] YANG D D, QIN Y J, XU Y R, et al. Sequestration of carbon dioxide from the atmosphere in coastal ecosystems: Quantification, analysis, and planning[J]. Sustainable Production and Consumption, 2024, 47: 413-424.

[6] OWERS C J, ROGERS K, WOODROFFE C D. Spatial variation of above-ground carbon storage in temperate coastal wetlands[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2018, 210: 55-67.

[7] WANG T, DENG Z M, ZHANG C Y, et al. Vegetation types and flood water level are dominant factors controlling the carbon sequestration potential in Dongting Lake floodplain, China[J]. Science of The Total Environment, 2024, 921: 171146.

[8] WANG H Q, STEYER G D, COUVILLION B R, et al. Predicting landscape effects ofMississippi River diversions on soil organic carbon sequestration[J]. Ecosphere, 2017, 8(11): e01984.

[9] DONG H Y, QIAN L W, YAN J F, et al. Evaluation of the carbon accumulation capability and carbon storage of different types of wetlands in the Nanhui tidal flat of the Yangtze River estuary[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, 192(9): 585.

[10]杨元合,石岳,孙文娟,等.中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献[J].中国科学:生命科学,2022,52(4):534-574.

[11]SONG S,WANG S H,SHI M X,et al.Urban blue-green space landscape ecological health assessment based on the integration of pattern, process, function and sustainability[J]. Scientific Reports,2022,12:7707.

[12]熊萍,殷建平,赵晏强,等.海洋碳汇助力碳中和态势分析[J].环境工程学报,2024,18(10):2686-2696.

[13]袁旸洋,郭蔚,汤思琪,等.城市蓝绿空间格局对碳固存的影响测度及关键指标[J].中国城市林业,2023,21(6):6-16.

[14]YUAN Y Y,TANG S Q,ZHANG J Q,et al.Quantifying the relationship between urban blue-green landscape spatial pattern and carbon sequestration:a case study of Nanjing's central city[J]. Ecological Indicators,2023,154:110483.

[15]LI X T,JIA B Q,LI F,et al.Effects of multi-scale structure of blue-green space on urban forest carbon density:Beijing,China case study[J].Science of The Total Environment,2023,883:163682.

[16]侯文硕,张瑶,张颖,等.城市绿地固碳释氧效益对植物群落特征因子响应分析[J].风景园林,2024,31(6):55-61.

[17]王嘉绮,王睿,王得祥.春季不同类型城市滨水绿地的微气候与人体舒适度研究[J].西北林学院学报,2020,35(3):231-236.

[18]AMANI-BENI M,ZHANG B,XIE G D,et al.Impact of urban park's tree,grass and waterbody on microclimate in hot summer days:a case study of Olympic Park in Beijing,China[J].Urban Forestry & Urban Greening,2018,32:1-6.

[19]汪柳皓,魏显虎,张宗科,等.青藏高原地区植被指数变化及其与温湿度因子的关系[J].森林与环境学报,2022,42(2):141-148.

[20]徐嘉昕,房世波,张廷斌,等.2000—2016年三江源区植被生长季NDVI变化及其对气候因子的响应[J].国土资源遥感,2020,32(1):237-246.

[21]JIA X L,HAN H T,FENG Y,et al.Scale-dependent and driving relationships between spatial features and carbon storage and sequestration in an urban park of Zhengzhou,China[J].Science of The Total Environment,2023,894:164916.

[22]JIANG Y F,SUN Y C,LIU Y Q,et al.Exploring the correlation between waterbodies, green space morphology, and carbon dioxide concentration distributions in an urban waterfront green space: a simulation study based on the carbon cycle[J]. Sustainable Cities and Society,2023,98:104831.

[23]嵇雨桐,林添怿,刘恋,等.城市公园绿地碳汇能力影响因素的网状荟萃(Meta)分析[J].风景园林,2025,32(1):23-31.

[24]ZHANG Y,MENG W Q,YUN H F,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.

[25]邵小燕.样地与像元的吻合度和数量对城市绿地LAI反演的影响[D].武汉:华中农业大学,2018.

[26]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(3):587-597.

[27]LI X P,ZHANG S N,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.

[28]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,2013.

[29]BREIMAN L.Random forests[J].Machine Learning,2001,45(1):5-32.

[30]DONG H Y,HU Y,QIAN L W,et al.Preliminary manifestation of the Yangtze River Protection Strategy in improving the carbon sink function of estuary wetlands[J].iScience,2024,27(2):108974.

[31]ALI MARI J,SOOTHAR R K,THIDAR M,et al.Effect of plastic film mulch and irrigation water regimes on soil temperature pattern, plant growth and water productivity of maize[J]. Ecological Frontiers,2024,44(4):752-759.

[32]LI C,SUN G,COHEN E,et al.Modeling the impacts of urbanization on watershed-scale gross primary productivity and tradeoffs with water yield across the conterminous United States[J].Journal of Hydrology,2020,583:124581.

[33]卞鸿雁,庞奖励,任志远.泾河流域固碳释氧功能的时空动态测评[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2013,41(2):94-99.

[34]王琳,祝亚鹏,卫宝立,等.快速发展的中小城市地表热环境及水体温度调控作用研究:以山东省滨州市为例[J].水土保持通报,2018,38(2):102-109.

[35]王晶懋,王一凡,张涛,等.城市街区单元绿地空间格局与植物群落碳汇效益优化研究[J].风景园林,2024,31(6):37-45.

[36]李和平,谢鑫,李聪聪.成渝双城地区景观格局的碳汇效应与优化建议:基于BP神经网络的分析和预测[J].城市发展研究,2023,30(1):92-102.

[37]王一洁,王璐冕,丁真慧,等.城市滨水绿地空间夏季微气候效应研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2025,49(2):233-241.