

城市绿地影响碳中和的途径与空间特征

——以上海市黄浦区为例

The Impact of Urban Green Space on Carbon Neutrality and Spatial Characteristics: A Case Study of Huangpu District in Shanghai

王 敏* 朱 雯
WANG Min* ZHU Wen

基金项目:

国家重点研发计划“绿色基础设施生态系统服务功能提升与生态安全格局构建”(编号: No.2017YFC0505705)

国家自然科学基金面上项目“基于多重价值协同的城市绿地空间格局优化机制: 以上海大都市圈为例”(编号: 52178053)

文章编号: 1000-0283 (2021) 10-0011-08

DOI: 10.12193/j.laing.2021.10.0011.002

中图分类号: TU986

文献标志码: A

收稿日期: 2021-06-11

修回日期: 2021-07-26

摘要

“双碳”目标下, 绿地作为城市区域内最主要的近自然生态空间, 同时具有绿色自然碳汇及降低碳排放的作用, 在实现碳中和过程中扮演重要角色。研究梳理城市绿地影响碳中和的途径和评估方法, 构建结合城市绿地增汇和减排效能的综合评估框架, 以上海市黄浦区为例全面评价城市绿地空间影响碳中和的直接和间接成效, 深入分析两种影响途径的空间分布特征。研究发现, 绿地率、类型、植被配植对绿地增汇效能影响较大, 绿地率、附属绿地占比、绿网建设、绿地分布均衡性及滨水绿地建设对绿地减排效能影响较大。研究进一步提出绿地碳中和综合效能提升策略及方法, 旨在以多维度、系统化的视角衡量城市绿地空间在促进碳中和方面的价值, 为城市绿地发展及优化提供参考。

关键词

城市绿地; 碳中和; 绿色碳汇; 碳排放; 空间特征; 优化策略

Abstract

In the context of peaking carbon dioxide emissions and achieving carbon neutrality, urban green space, as the main approx-natural ecological space in urban areas, play an essential role in the realization of carbon neutrality through increasing green carbon sequestration and reducing carbon emissions simultaneously. Based on the analysis of approaches and assessment methods of urban green space carbon neutrality efficiency, the paper proposed a comprehensive evaluation framework that combines the efficiency of carbon sink increase and carbon emission reduction of urban green space. Taking the Huangpu District of Shanghai as an example, the article comprehensively evaluates urban green space's direct and indirect effects on carbon neutrality. It profoundly analyzes the spatial distribution characteristics of the two influencing pathways. The article found through research that the rate, type, and planting of vegetation have a more significant impact on the efficiency of green space for sinking. The rate of green space, the proportion of subsidiary green space, the construction of green nets, the balance of green space distribution, and the construction of waterfront green space have a more significant impact on green space emission reduction efficiency. The article further proposes strategies and methods to improve the overall efficiency of green space carbon neutrality, and aims to measure the value of urban green space in promoting carbon neutrality from a multi-dimensional and systematic perspective and provide a reference for the development and optimization of urban green space.

Key words

urban green space; carbon neutrality; green carbon sequestration; carbon emission; spatial features; optimization strategies

王 敏

1975年生/女/福建人/博士/同济大学建筑与城市规划学院景观学系副主任, 副教授, 博士生导师/上海市城市更新及其空间优化技术重点实验室水绿生态智能分实验中心(Eco-SMART LAB)联合创始人/自然资源部大都市国土空间生态修复工程技术创新中心成员/研究方向为水绿空间生态系统服务、城市绿地与生态规划设计、韧性景观与城市可持续(上海200092)

朱 雯

1997年生/女/陕西人/同济大学建筑与城市规划学院景观学系硕士在读/研究方向为风景园林规划与设计(上海200092)

*通信作者 (Author for correspondence)

E-mail: wmin@tongji.edu.cn

快速城市化进程中，城市空间密度、人口密度和经济活动强度急剧上升，土地利用和覆被发生巨大变化，能源的超常消耗导致以二氧化碳为主的人为排放温室气体增加，加剧了局地、区域乃至全球气候变暖，威胁到生态环境、国家能源安全、粮食安全、生物多样性、人类生存及城市社会经济发展等多方面^[1]。为了减缓气候变化，将高于工业化前水平的升温控制在1.5℃之内，2020年9月习近平在第75届联合国大会上提出，中国力争在2030年前达到碳排放峰值，到2060年前实现“碳中和”^[2]。

城市绿地是城市区域内重要的近自然生态空间，能够固碳释氧，并有效缓解热岛效应，减少城市整体耗能，在实现碳中和总体目标中扮演重要角色^[3]。目前国内外关于城市绿地碳中和的研究多集中于碳汇绩效测算^[4]与碳汇评价体系建立^[5]等方面，有关绿地对城市减排的作用聚焦于理论探索与小尺度研究，缺乏中尺度和大尺度的实证研究。为了全面了解城市绿地的“碳中和”效能，整体认知绿地直接增汇、间接减排的功能与价值，研究基于“双影响途径”尝试构建城市绿地空间对碳中和影响的综合评估框架，并选取上海市黄浦区为实证研究对象，量化分析城市绿地增汇和减排的效能及其空间分布特征，提出绿地碳中和综合效能提升策略及方法，为城市绿地发展优化提供参考。

1 绿地影响碳中和的途径与评估方法

一方面，城市绿地植物通过光合作用有效吸收、转化大气中的二氧化碳并将其固定在植被和土壤中，从而减少二氧化碳的浓度，这是构成负排放技术的重要部分，是城市绿地影响碳中和的最直接途径^[6]。城市绿色碳汇的影响因素有植物类型、年龄、规格和群落结构、大气温度与相对湿度，及人为干扰等多方面^[7]。

目前绿地直接提高碳汇效能的定量评估以实物量核算和价值量核算为主，实物量核算能反映绿地的直接碳汇贡献价值，而价值量核算能更好评估碳汇对经济发展的贡献^[8]。实物量核算方法中的现场测定法依靠冠层分析仪和红外线分析仪，较为精确但耗时耗力，外界干扰大且时间同步性受限^[9]；样地清查法以生物量法和蓄积量法为主，但在时空变化分析上较为局限，且容易受到主观因素干扰，误差较大^[10]；遥感估算法较客观，数据容易获取，但存在精度有限、小尺度核算误差较大的劣势^[11]；模型模拟法考虑到植被种类、规格、

地理气候环境等多方面影响因素，能够准确专业评估各种尺度的绿地生态效益^[12]。

另一方面，绿地能够通过影响城市热环境，减少城市总体能耗，间接达到减排效果。场地尺度下，城市绿地中的乔木可以遮阳、防风，改善建筑周围的微气候环境条件；城区尺度下，城市绿地的规模和分布特征能够改变城市热平衡，降低城市热岛强度^[13-14]。热岛效应是城市空间形态层面影响全社会能源使用的重要中介要素，降低热岛效应能够有效减少城市能耗^[15-16]。

目前城市绿地间接减少碳排放的评估聚焦于小尺度实证及模拟研究。佛罗里达州对一座临时建筑的研究表明，建筑周边的绿地最多可减少其50%的日常生活用电^[17]。洛杉矶的一项模拟研究估计一棵乔木一年可节约18 kg的碳排，但其每年吸收的碳仅有4.5 ~ 11 kg，对建筑能耗的影响显著^[13]。盐湖城的研究发现，如果每户都种植4棵乔木，地方电厂每年可减少9 000 t的碳排放^[18]。

2 综合研究框架与测算方法

2.1 综合研究框架

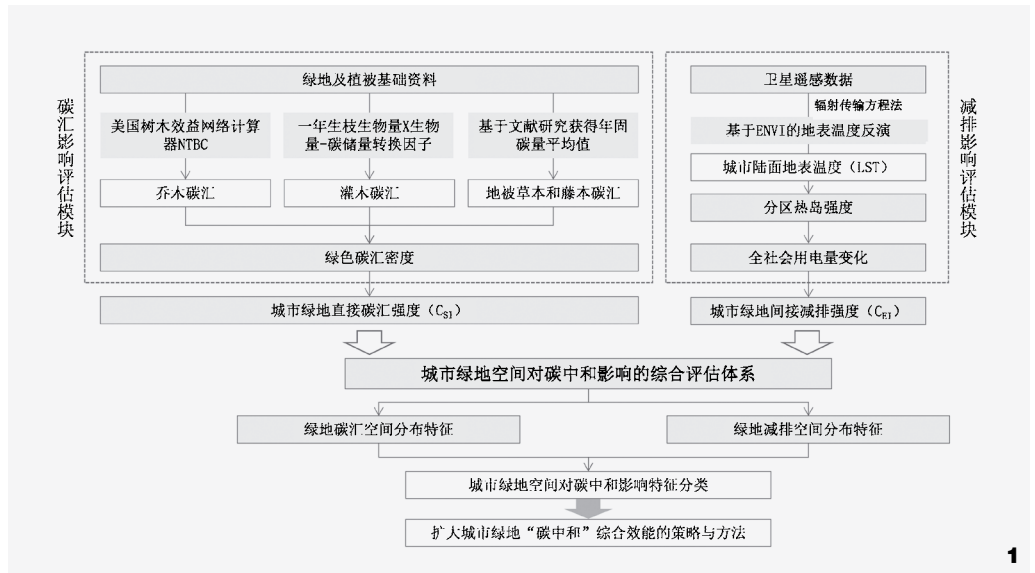
“碳中和”（Carbon Neutrality）是应对全球温室效应问题重要且全面的环境管理工具^[19]，概念源于20世纪的西方，是指实现二氧化碳净零排放，即人为温室气体排放总量必须通过植树造林、节能减排等措施抵消^[20]。为全面分析城市绿地对于碳中和的影响作用，研究选取绿色碳汇密度作为碳汇强度的表征指标，将热岛强度通过全社会用电量变化转换为减排强度的表征指标，二者比对构建城市绿地影响碳中和的综合评估框架（图1）；具体选取上海市黄浦区为研究对象，进一步分析城市绿地增汇和减排效能的空间分布特征，对其综合影响特征进行分类及归纳，提出优化城市绿地碳中和效能的策略与方法。

2.2 基于NTBC模型算法的碳汇效能估算

研究利用美国树木效益网络计算器（National Tree Benefit Calculator, NTBC）进行乔木年碳汇量计算，灌木碳汇量依据一年生枝生物量与生物量-碳储量转换因子的乘积计算^[21]，地被草本和藤本植物依据文献获得年固碳量平均值进行计算^[22]。城市绿地年绿色碳汇总量（ C_S ）的计算方法为公式（1）。

$$C_S = \sum_{i=1}^j C_{tr} \times N_i + \sum_{m=1}^n C_{sh} \times S_m + \sum_{p=1}^q C_{cv} \times S_p \quad (1)$$

其中， C_{tr} 是第*i*种乔木单棵植物的年碳汇量， N_i 是第*i*种乔木数量， C_{sh} 是第*m*种灌木单位面积年碳汇量， S_m 为第*m*种灌木面



1. 城市绿地空间影响碳中和的综合研究框架

积, C_{vj} 是第 p 种地被草本或藤本植物单位面积年碳汇量, S_p 为第 p 种地被草本或藤本植物面积, j 为乔木种类数, n 为灌木种类数, q 为地被草本或藤本植物种类数。

研究选取城市绿地绿色碳汇密度作为绿色碳汇强度 (C_{S1}) 的表征指标, 计算方法为公式 (2)。

$$C_{S1} = C_S / S \quad (2)$$

其中 S 为样本用地总面积。

2.3 基于地表温度反演的绿地减排效能评估

绿地通过降低城市地表温度实现间接减排。目前城市热环境研究方法主要有传统地面气象观测技术、热红外遥感技术和数值模拟技术。其中, 地面观测技术中气象站监测站点数量有限、车载气象观测仪器不具有时间同步性, 因此其应用逐渐减少^[23]; 数值模拟技术包含城市边界层数值模式、城市冠层模式和基于流体动力学的模型, 能够实现较精确的情景模拟, 但所需的基础背景数据较多, 边界条件设置复杂^[24]; 热红外遥感技术包含卫星热红外遥感、高分辨率航空热红外遥感和地面热红外成像技术, 获取数据具有连续性、完整性

和实时性, 因此得到广泛运用^[25]。常用的地表温度反演方法有单窗算法、单通道算法、劈窗算法、辐射传输方程法等^[26]。

研究选取卫星遥感技术获取基础数据, 利用辐射传输方程法反演城市地表温度。借助 ENVI5.3 软件完成热红外和多光谱的辐射定标、Flaash 大气校正, 并计算归一化植被指数 (NDVI), 然后采用混合像元分解法^①计算植被覆盖度, 分别计算水系、城镇和自然表面的地表比辐射率。根据电磁波的辐射传输理论, 卫星传感器接收到的热红外辐射亮度值由黑体辐射亮度、大气下行辐射亮度和大气上行辐射亮度三部分组成, 其计算方法^[27]为公式 (3)。

$$L_\lambda = [\varepsilon \cdot B(T_s) + (1 - \varepsilon)L_\downarrow] \cdot \tau + L_\uparrow \quad (3)$$

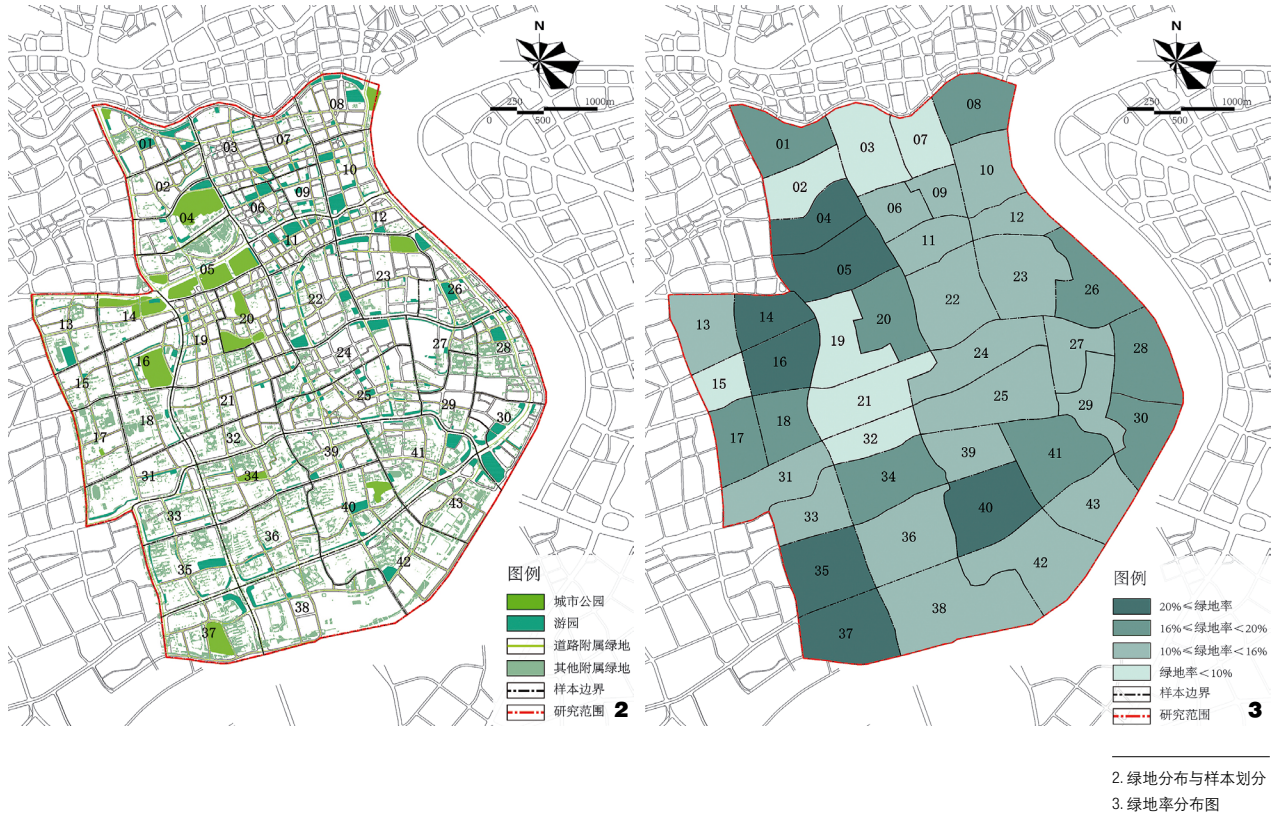
其中, ε 为地表比辐射率, T_s 为地表真实温度, $B(T_s)$ 为普朗克定律推导的黑体在 T_s 的辐射亮度值, τ 为大气在热红外波段的透过率。

由黑体辐射亮度可进一步计算地表温度^[27], 见公式 (4)。

$$T_s = K_2 / \ln \left[\frac{K_1}{B(T_s)} + 1 \right] \quad (4)$$

其中 K_1 和 K_2 是针对不同卫星遥感类型的常数。

① 研究具体采用混合像元二分模型, 利用 NDVI 值估算植被覆盖度。其计算公式为: $F_v = (NDVI - NDVI_{T_s}) / (NDVI_{T_s} - NDVI_{T_0})$, 其中 F_v 为植被覆盖度, $NDVI_{T_s}$ 代表完全被植被覆盖的像元的 NDVI 值, $NDVI_{T_0}$ 代表裸土或无植被覆盖区域的 NDVI 值。在本研究中, $NDVI_{T_s}$ 选取研究范围内 NDVI 最大值 0.7, $NDVI_{T_0}$ 取 0。



城市热岛强度 (Urban Heat Island Intensity, UHI) 是指同时间城市中心区气温与周围郊区平均温度的差值, 将其作为城市生态指标之一有助于客观反映城市生态现状^[28], 计算方法为公式 (5)。

$$UHII = T_i - T_{su} \quad (5)$$

其中 T_i 是指城市中心区第 i 个样本的平均气温, T_{su} 指同一时间城市郊区的平均温度。

研究将热岛强度转化为全社会用电量变化^[17-18], 以定量衡量城市绿地的减排强度 (C_{EI}), 计算方法为公式 (6)。

$$C_{EI} = \frac{\alpha K_a K_b N_i (T_{max} - UHII)}{S} \quad (6)$$

其中 K_a 为温度与用电量的转换因子, 即夏季气温升高 1°C , 年人均电力消费增加量, 相关研究表明当上海平均气温在 20°C 以上时, 此系数为 $220 \text{ kWh}/(^\circ\text{C} \cdot \text{y})$ ^[29]; K_b 指单位发电量的二氧化碳排放量, 通常取值为 0.997 kg/kWh ; α 是二氧化碳排放量转换为碳排放量的系数, 一般取值 $3/11$ ^[30]; N_i 为第 i 个样本空间

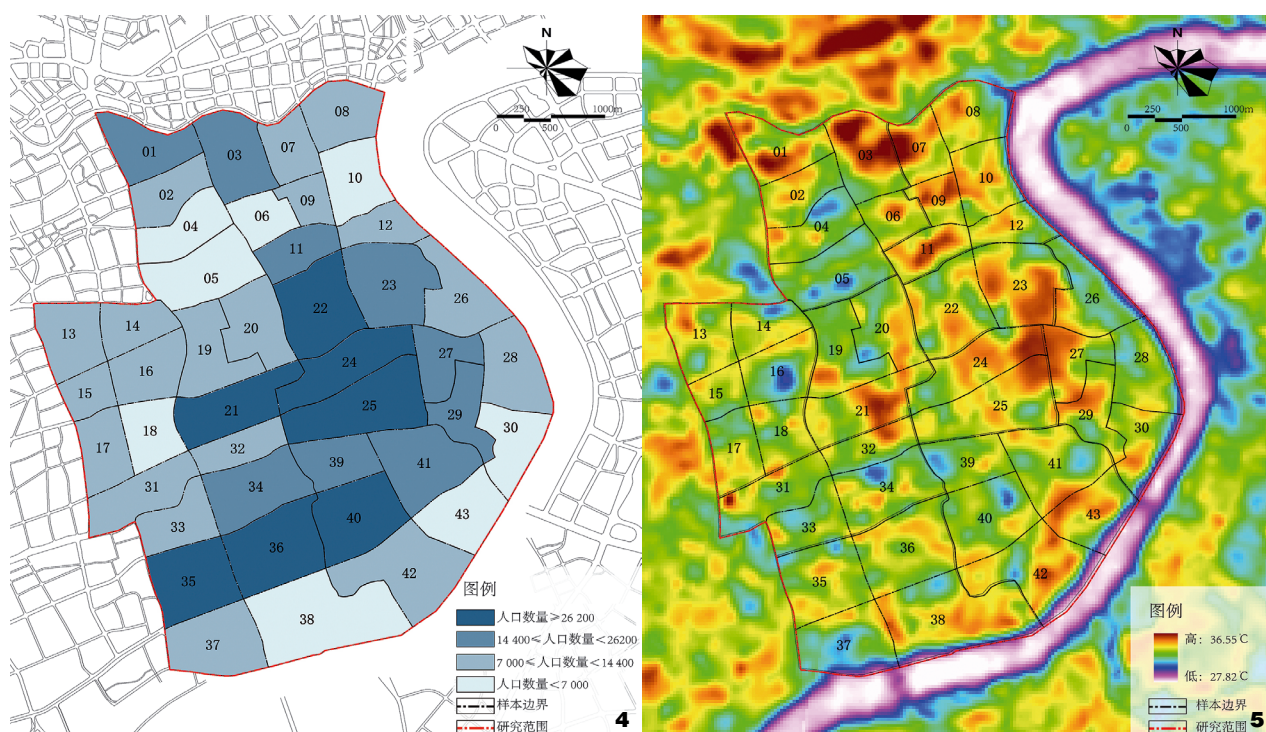
范围内的人口数量; T_{max} 为样本区域平均温度的最大值; S 为样本用地总面积。

3 上海市黄浦区实证研究

3.1 研究对象与数据来源

选取上海市黄浦区为研究对象, 全区陆域面积 18.71 km^2 , 内部无大型集中水面。2015 年区域内共有城市公园 13 个, 总面积约 68.83 hm^2 , 游园面积约 88.25 hm^2 , 道路附属绿地面积约 3.39 hm^2 , 其他附属绿地面积约 165.68 hm^2 , 合计绿地面积有 326.15 hm^2 。

黄浦区有 10 个街道共 192 个居委会, 为便于数据采集和考察绿地空间特征, 研究依据街道边界, 参考居委会划分、城市主要道路和河流, 将 10 个街道进一步划为 43 个样本区域。每个样本区域的规模控制在 $30 \sim 50 \text{ hm}^2$, 且均分布有公园绿地 (图 2)。根据统计结果, 绿地率较高的样本集中在西北与西南片区 (图 3), 而人口数量较高的区域集中在中部及偏



4. 人口数量分布图
5. 地表温度分布图

南区(图4)。

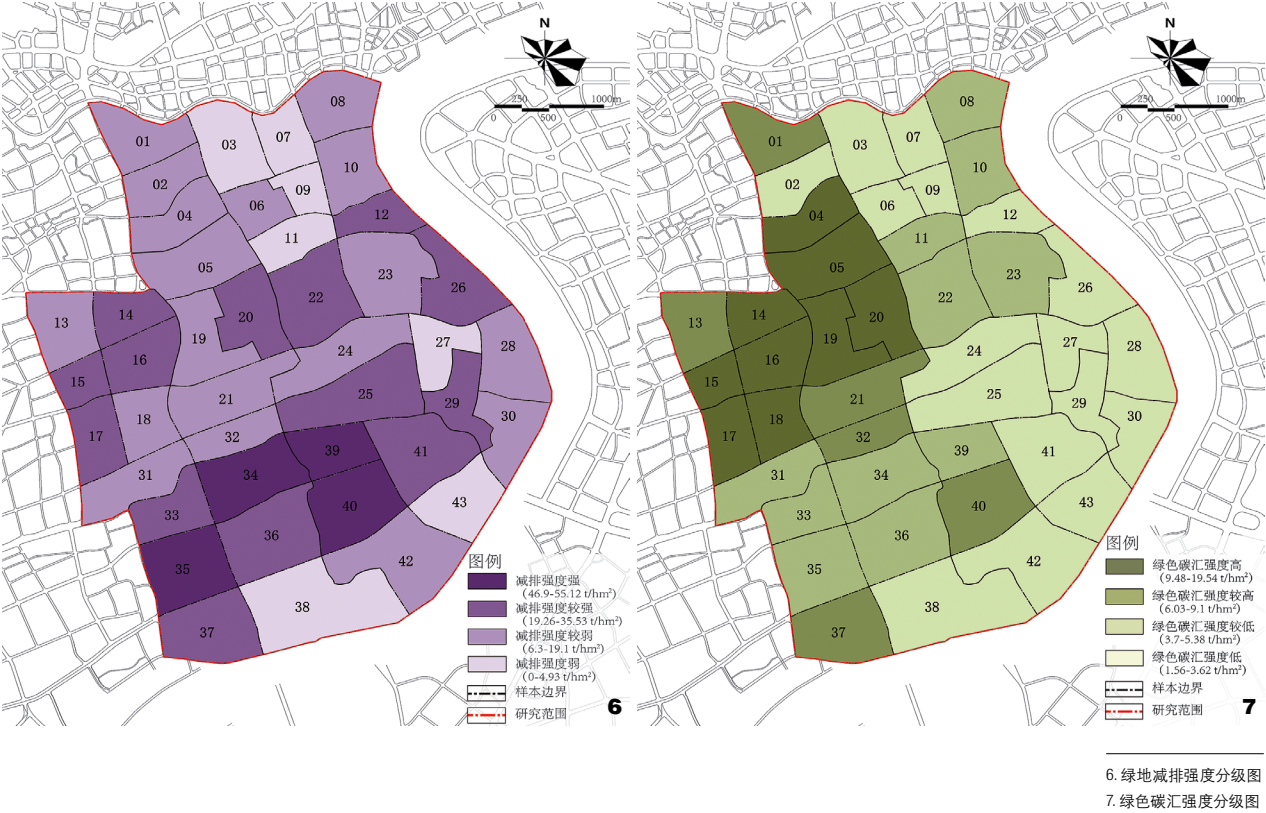
研究涉及的基础数据及获取途径包括:(1) 2015年8月2日的Landsat 8 OLI_TIRS卫星遥感数据,源自地理空间数据云,采集时云量为0.33%;(2) 研究区域内不同类型城市绿地分布及植被特征,通过2015年8月至2015年10月的实地调研获得,主要包括用地面积、乔木种类、乔木数量、乔木胸径、灌木种类、灌木面积、地被草本及藤本植物面积;(3) 人口数量,采用第6次全国人口普查的常住人口数据。

3.2 绿地减排效能估算结果与空间特征分析

地表温度反演结果显示,2015年8月2日上海市郊区同一时间的平均地表温度为30.95℃,上海市主城区平均地表温度为32.63℃,热岛强度为1.68℃;研究范围内平均地表温度为33.03℃,热岛强度为2.08℃(图5)。根据热岛强度计算绿地的减排强度,结果表明绿地减排效能高的样本连续集中分布在西南片区,总体呈现南部较高、向北递减的趋势(图6)。其

中,减排强度大的样本为34、35、39和40号,其减排强度分别为46.9 t/hm²、47.61 t/hm²、52.9 t/hm²、55.12 t/hm²,在绿地空间布局上呈现以下特点:(1) 样本内绿地面积较大,空间整体绿地率高,如35、40号样本;(2) 附属绿地在绿地总量中所占比例较高,如34、39号样本;(3) 充分发挥道路附属绿地作用,构成高密度绿网,如34、39、40号样本;(4) 样本中心有较大面积的集中绿地,如34、35、40号样本;(5) 绿地分布在人口密度较高区域,如35、40号样本。

绿地减排强度较强的有14个样本,主要分布在中部及南部片区。分析其绿地空间特征:(1) 内部大型绿地较少,但带状游园与道路附属绿地共同构成绿网,且附属绿地分布均衡,如22、25、26、33、36号样本,其减排强度分别为32.98 t/hm²、22.57 t/hm²、24.99 t/hm²、24.99 t/hm²和35.53 t/hm²;(2) 利用滨江优势布局较大面积的沿江绿地,充分发挥水体的降温辐射效应,如12、26、37号样本,其减排强度分别为19.26 t/hm²、24.99 t/hm²和26.42 t/hm²。



绿地减排强度弱的有7个样本，其减排强度在0 ~ 5 t/hm²，主要分布在南北两端。分析其绿地空间特征：(1) 绿地率低，且内部缺乏大型绿地，如3、7、27号样本；(2) 绿地分布不均衡，样本内较大范围内几乎无绿地分布，造成局部过热现象，如3、7、27、38号样本。

3.3 绿色碳汇效能估算结果与空间特征分析

绿色碳汇强度计算结果显示，强度高的样本集中分布在黄浦区西部，北部、东部及南部片区，均存在大量连续分布的低碳汇效能样本(图7)。整体上看，绿地率与绿色碳汇强度总体呈正相关。进一步分析绿地率低而碳汇强度高的样本，发现在绿地布局上呈现以下特征：(1) 开发地块中布局较大面积附属绿地，如15号样本，其碳汇强度为11.87 t/hm²；(2) 道路附属绿地分布均衡，相连构成高密度绿网，如19号样本，其碳汇强度为11.32 t/hm²。比较分析绿地率高而碳汇强度低的样本，主要分布在东部沿江区域，其空间特征为：(1) 公园绿地

以游园为主且分散布局，如26、28、30、41号样本，其碳汇强度分别为3.01 t/hm²、1.56 t/hm²、2.22 t/hm²和3.62 t/hm²；(2) 道路附属绿地较少，多为单侧分布，没有形成绿色网络，如28、30号样本；(3) 绿地整体分布不均衡，较大范围内几乎无绿地分布，如26、28、30号样本。

3.4 绿地影响碳中和的分类与空间特征

以43个样本平均减排强度和平均增汇强度的交点为坐标原点划分4个象限，运用散点图对比分析研究样本的绿地碳汇强度和减排强度(图8)，绘制碳中和效能空间分布图(图9)，进一步分析总结影响绿地碳中和综合效能的绿地布局空间特征(表1)。

4 绿地碳中和增效策略与方法

4.1 扩大绿地面积，重视附属绿地建设和植被配植

(1) 一定的绿量是实现碳中和综合效能提升的基本保障，

表1 绿地碳中和效能类型及空间特征

样本象限	样本类型	数量占比/%	样本编号	空间特征
第Ⅰ象限	高碳中和效能型	16.28	14、15、16、17、20、37、40	绿地率高；较大面积集中绿地；附属绿地广泛均衡分布；绿网密度高；利用滨江优势
第Ⅱ象限	强减排弱碳汇型	23.26	22、25、26、29、33、34、35、36、39、41	绿地率较低；人口密度大；缺乏道路附属绿地
第Ⅲ象限	低碳中和效能型	41.86	2、3、6、7、8、9、10、11、12、23、24、27、28、30、31、38、42、43	绿地率低；附属绿地占比低；绿地分布不均衡
第Ⅳ象限	强碳汇弱减排型	18.60	1、4、5、13、18、19、21、32	绿地率较高；较大面积核心绿地；绿网密度低；人口密度低

对于绿地率低的地区，规划应当扩大绿地面积，可能情况下建议优先在中心区域布局较大面积的公园绿地。(2) 重视高效能小微型绿地和附属绿地的建设，形成整体相对紧凑、内部疏密有致的空间形态。(3) 优化绿地植被配植、建设和管理，丰富植物种类和层次，形成种类多样、高效多能的植被群落^[31]，提升绿地增汇减排能力。

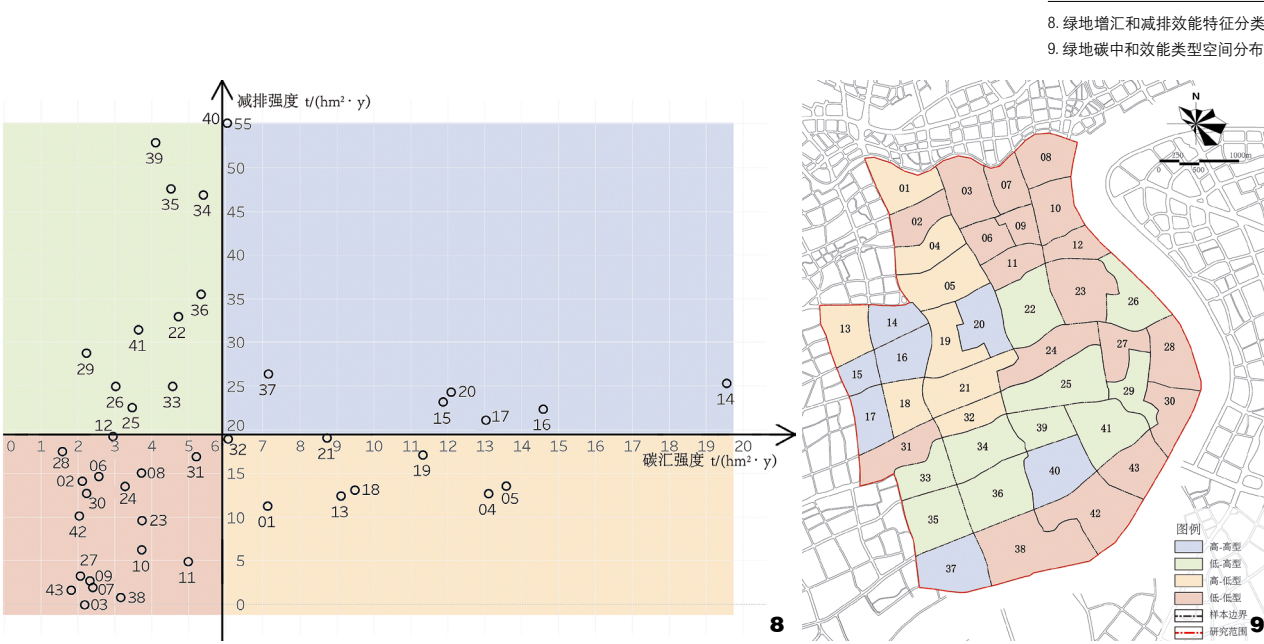
4.2 人口密度较高的地方优先布局绿地

在人口密度较高的区域优先布局绿地，能够获得较高的减排效益，有利于碳中和目标的实现。规划应在人口密集区域

“见缝插针”布局绿地。在增量布局比较困难的高密度城区，鼓励推行立体绿化，增加绿强度，如屋顶绿化、墙体垂直绿化、棚架绿化、檐口绿化等。

4.3 依托道路附属绿地和滨水空间构建绿网

高密度绿网的建设能够同时促进绿地增汇与减排效能。绿地建设应注重道路附属绿地的连通和均衡分布，并通过滨水绿地建设、河网森林保护与修复、垂直河岸的绿道建设等方式扩大水体降温辐射效能，形成较整体的绿地减排增汇网络结构，充分发挥有限绿地的碳中和综合效能。



5 结论与展望

城市绿地的合理布局和建设管理与我国“碳达峰”和“碳中和”目标的实现紧密相关。研究梳理城市绿地间接减少碳排放和直接增加碳汇两种途径，尝试构建城市绿地空间影响碳中和的综合评估框架，分类型分析其空间特征，进而提出绿地碳中和综合效能提升策略及方法，旨在以多维度、系统化的视角衡量城市绿地在影响碳中和方面的价值。上海黄浦区的实证研究表明，显著影响绿地直接增汇效能的主要有绿地率、绿地类型和植被配置；显著影响绿地间接减排效能的主要有绿地率、附属绿地占比、绿网建设、绿地分布均衡性和滨水绿地建设。综合考虑绿地布局对于碳中和的“双影响途径”，研究尝试提出多方面的增效策略及方法，包括扩大绿地规模、优化绿地类型、重视植被配植、合理布局绿地、构建道路及滨水绿网等。

研究从街区尺度切入展开评价分析，明晰城市绿地影响碳中和的途径和空间特征，未来还应在更小的街坊尺度以及更大的区域尺度、国家尺度等展开研究，构建城市绿地对碳中和影响的多尺度综合认知，为城市绿地发展及优化提供参考。此外，碳中和的实现除了提升城市绿地自身效能之外，仍需与能源、工业、交通、建筑和农业等多种城市功能协调，未来还应与碳捕捉、利用和封存等多种技术结合应用，不断提升绿地在增汇减排方面的价值。▲

参考文献

- [1] 赵守栋, 王京凡, 何新, 等. 城市化对气候变化的影响及其反馈机制研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2014, 50(01): 66-72.
- [2] 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话[EB/OL]. [2020-09-22]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content_5546168.htm
- [3] 高彦. 城市绿地系统在低碳城市建设中的作用[J]. 住宅与房地产, 2018(11): 58.
- [4] 叶祖达. 建立低碳城市规划工具——城乡生态绿地空间碳汇功能评估模型[J]. 城市规划, 2011, 35(02): 32-38.
- [5] 王敏, 石乔莎. 城市高密度地区绿色碳汇效能评价指标体系及实证研究——以上海市黄浦区为例[J]. 中国园林, 2016, 32(08): 18-24.
- [6] 王永华, 高含笑. 城市绿地碳汇研究进展[J]. 湖北林业科技, 2020, 49(04): 69-76.
- [7] 王敏, 石乔莎. 城市绿色碳汇效能影响因素及优化研究[J]. 中国城市林业, 2015, 13(04): 1-5.
- [8] 张颖, 周雪, 覃庆锋, 等. 中国森林碳汇价值核算研究[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(06): 124-131.
- [9] 朱凯, 张倩倩, 武鹏飞, 等. 城市绿地碳汇核算方法及其研究进展[J]. 陕西林业科技, 2015(04): 34-39.
- [10] 郭靖, 卢明艳, 张东亚, 等. 样地清查法在森林碳汇估算中的应用进展[J]. 防护林科技, 2016(07): 102-103.
- [11] 黄从红, 张志永, 张文娟, 等. 国外森林地上部分碳汇遥感监测方法综述[J]. 世界林业研究, 2012, 25(06): 20-26.
- [12] 彭立华, 陈爽, 刘云霞, 等. Citygreen模型在南京城市绿地固碳与削减排流效益评估中的应用[J]. 应用生态学报, 2007(06): 1293-1298.
- [13] AKBARI H. Shade Trees Reduce Building Energy Use and CO₂ Emissions from Power Plants[J]. Environmental Pollution, 2002(116): 119-126.
- [14] 滕明君, 周志翔, 岳辉, 等. 低碳园林的生态学途径[J]. 中国园林, 2012, 28(04): 40-43.
- [15] EWING R, RONG F. The Impact of Urban Form on US Residential Energy Use[J]. Housing Policy Debate, 2008, 19(1): 1-30.
- [16] 杨磊, 李贵才, 林姚宇, 等. 城市空间形态与碳排放关系研究进展与展望[J]. 城市发展研究, 2011, 18(02): 12-17.
- [17] PARKER J H. Landscaping to Reduce the Energy Used in Cooling Buildings[J]. Society of American Foresters, 1983(2): 82-105.
- [18] 赵彩君, 刘晓明. 城市绿地系统对于低碳城市的作用[J]. 中国园林, 2010, 26(06): 23-26.
- [19] 邓明君, 罗文兵, 尹立娟. 国外碳中和理论研究与实践发展述评[J]. 资源科学, 2013, 35(05): 1084-1094.
- [20] 邓旭, 谢俊, 滕飞. 何谓“碳中和”? [J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(01): 107-113.
- [21] 方燕辉. 上海25种常见灌木的固碳能力及其与叶性状的关系[D]. 上海: 华东师范大学, 2013.
- [22] 周国逸, 唐旭利. 广州市森林碳汇分析[J]. 中国城市林业, 2009, 7(01): 8-11.
- [23] 李丽光, 王宏博, 贾庆宇, 等. 辽宁省城市热岛强度特征及等级划分[J]. 应用生态学报, 2012, 23(05): 1345-1350.
- [24] 蒋理, 刘超, 舒谦. 应用WRF-UCM模型分析城市绿色廊道对热岛效应的影响——以上海市为例[J]. 建筑节能, 2019, 47(10): 89-96.
- [25] 胡嘉骢, 朱启疆. 城市热岛研究进展[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2010, 46(02): 186-193.
- [26] 宋挺, 段峥, 刘军志, 等. Landsat 8数据地表温度反演算法对比[J]. 遥感学报, 2015, 19(03): 451-464.
- [27] 王勇, 李发斌, 李何超, 等. RS与GIS支持下城市热岛效应与绿地空间相关性研究[J]. 环境科学研究, 2008(04): 81-87.
- [28] 李柏廷, 任志远, 李瑞宗, 等. 西安市地表温度反演及城市热岛强度定量研究[J]. 资源科学, 2014, 36(12): 2631-2636.
- [29] 王桂新, 沈续雷. 气温变化对上海市日电力消费影响关系之考察[J]. 华北电力大学学报(社会科学版), 2015(01): 35-41.
- [30] 李媛芳, 张晓平. 中国城市居民生活用电碳排放差异及时空演变[J]. 热带地理, 2015, 35(02): 250-257.
- [31] 张庆贵, 李燕. 城市绿地调整优化理论与技术[J]. 园林, 2011(03): 8-11.