城市绿地碳汇测算方法研究进展

江佩宜[1,2] 戴 菲[1,2]

1 华中科技大学建筑与城市规划学院 武汉 430074

2 湖北省城镇化工程技术研究中心 武汉 430074

摘要：全球气候变暖加剧、“双碳”目标的提出、城市碳排的增加，使得固碳增汇的任务刻不容缓。城市绿地作为重要的碳汇来源，能有效改善城市环境、缓解碳汇压力、提升生态效益，维持碳氧平衡。由此评估碳汇效益，估算碳汇能力，对实现碳的可视化管理和碳中和目标具有推动作用。文章在梳理样地清查法、软件模拟法、遥感反演法、涡度相关法 4 种城市绿地碳汇测算方法原理的基础上，归纳并比较了 4 种方法的应用规模与优缺点，最后，从完善测算体系与指导规划实践两方面对城市绿地碳汇测算方法的发展趋势进行展望。

关键词：碳汇；城市绿地碳汇；测算方法；碳汇效益；遥感

DOI：10.12169/zgcsly.2023.06.29.0003

Research Progress in Carbon Sink Measurements for Urban Green Space

Jiang Peiyi[1,2] Dai Fei[1,2]

(1. School of Architectureand Urban Planning, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Hubei Engineering and Technology Research Center of Urbanization, Wuhan 430074, China)

Abstract: It is extremely urgent to sequestrate carbon and enhance carbon sink in the context of the intensification of global warming, the introduction of the “dual carbon” goals, and the increase in urban carbon emissions. As an important source of carbon sink, urban green spaces can effectively improve the urban environment, alleviate the pressure on carbon sequestration, enhance ecological efficiency, and maintain carbon-oxygen balance. Resultingly, the assessment of carbon sink benefits and estimation of carbon sink capacity are instrumental in realizing carbon visualization management and carbon neutrality. The paper reviews the rationales of 4 carbon sink measurement methods that are used in urban green space, i. e., sample inventory method, software simulation method, remote sensing inversion method, and eddy correlation method, and summarizes and compares the scales of their application, advantages and disadvantages. At the end, the development trend of the carbon sink measurements for urban green spaces is discussed, focusing on the constant improvement of the measurement system and provision of guidance for planning and practices.

Keywords: carbon sink; carbon sink in urban green space; measurement method; carbon sink benefit; remote sensing

收稿日期：2023-06-29

* 基金项目：国家自然科学基金面上项目（52178041）

第一作者：江佩宜（1998-），女，博士生，研究方向为城市蓝绿空间碳汇、风景园林规划与设计。E-mail：352508278@qq.com

通信作者：戴菲（1974-），女，博士，教授，博士生导师，研究方向为绿色基础设施、城市绿地系统。E-mail：58801365@qq.com

全球的气候变暖问题日趋加剧，为此国际组织制定了相关公约与协议以解决气候问题。2020 年 9 月，习近平总书记在联合国大会上宣布，中国力争于 2030 年前达到二氧化碳排放峰值、力争 2060 年前实现碳中和。城市作为人类活动的物质载体，也是碳排放的主要来源地[1]。城市绿地碳汇是指城市绿地空间内植物通过光合作用，吸收大气中的二氧化碳并将其固定在植被和土壤之中，减少大气中二氧化碳浓度的过程[2]。城市绿地能激活固碳效应，提供直接增汇途径，也是实现“双碳”目标的重要阵地。已有学者对植物群落、植株个体与碳汇能力的关系展开分析发现，植被种类、年龄、植被分布密度、组合方式都会影响碳汇能力[3-6]。增加碳汇数量、提升碳汇质量不仅能维持城市的碳氧平衡、改善城市环境、调节城市微气候，还能有效缓解碳汇压力，优化生态效益。因此，了解现阶段碳汇测算方法，分析未来发展趋势，对实现碳的可视化管理和“双碳”目标具有重要推动作用。

1 城市绿地碳汇测算方法

1.1 样地清查法

样地清查法是指通过对典型样地中的植被、土壤等碳储量进行测量与分析后，得出某时段内碳储量的变化[7]，主要包括生物量法和生物量转换因子法两种[8]。生物量法适用于植株尺度，方法直接，技术简单，因倾向于选取优质绿地进行测定，数值存在高估，不具有代表性；生物量转换因子法适用于小型灌草植被，也可对有资料的城市、国家尺度碳汇量进行估算，但数据资料覆盖不全面，容易导致各区域尺度结果存在偏差。两种方法多使用微观尺度的植物变量进行计算，而植物生长周期是一个漫长的过程，且需要多个清查样地，耗时耗力，工作量较大，但技术成熟、应用面较广。

1.1.1 生物量法

该方法主要结合了实测生物量数据、遥感技术和生命周期评估（LCA）。实测生物量数据通常来源于小规模的精确测量，特别适用于针对样地中特定植物群落或单一植被的研究。遥感技术适用于大规模的绿地和城市尺度的评估，利用卫星或航拍数据来估算碳汇，尽管遥感技术可能在精度上略有不足，但能有效减少实地调查的需求。LCA 提供了一个更深入但复杂的视角，考虑了植物整个生命周期的碳足迹，能够为长期固碳效益的评估提供分析。

王迪生[9]通过实测发现，乔木相比灌木具有更高的固碳效益，特别是常绿乔木。Shadman 等[10]也通过实测得出树木高度与碳汇能力的强关联性，15 年以上的高大树木固碳能力更强。而在运用遥感技术方面，殷利华等[11]通过遥感影像分析表明，乔木规格与碳汇能力呈正相关。同时，鲁敏等[12]利用卫星影像对城市绿地进行分类，进而对碳汇和碳排进行评估。在 LCA 方法的应用中，Zhang 等[13]揭示了乔木、灌木和草坪在不同生长阶段的固碳潜力和稳定性。

1.1.2 生物量转换因子法

根据精度和范围的差异，生物量转换因子法主要有两种应用方式。

一种方式是基于特定统计的树木数据建立方程，通过计算树木的材积、密度和转换因子推算生物量，可简称为特定统计法。这种方式适用于有详细样地数据的研究，能够提供相对精确的生物量估算。例如，李源清等[14]通过分析郑州市 13 种乔木的数据，揭示了乔木和灌木在绿化碳汇中的不同贡献；欧强新等[15]也采用这种方法，分析了福建省马尾松的生物量因子，探讨了植物的胸径、年龄和高度等因素对碳汇量的影响，这些研究强调了详细数据在准确估算碳汇方面的重要性。

另一种方法是利用现有的资源清查数据，依据总蓄积量计算生物量和碳汇，适用于需要进行大规模评估和动态变化评估的研究，可简称为总量评估法。例如，方精云等[16]结合公开清查数据和遥感图像估算中国植被的碳汇量，揭示出草地和灌木作为潜在碳汇的地域差异性。

1.2 软件模拟法

近年来，国外有多个软件均可进行碳汇计算。国内常用软件是由美国林务局开发的 i-Tree 和 CITYgreen[17]，以及由美国斯坦福大学、世界自然基金会（WWF）和大自然保护协会（TNC）联合开发的 InVEST 模型[18]。i-Tree 多适用于不同乔

木、灌木，以及城市尺度的绿地碳汇量测算，适用范围广；CITYgreen 是单个树种以及区域尺度的生态效益计算器，需结合调查地块的遥感影像或样地内植被的详细数据进行后续计算，缺乏对灌木、草地的生态效益评价。这两款软件操作简单，运算快捷、较为成熟，可对碳汇效益进行经济量化。InVEST 模型结合土地利用类型测算碳储量变化，其所需数据较少，操作便捷，可生成图示语言，结果直观[19]；i-Tree 和 CITYgreen 数据库中多为国外植被数据，缺少本土化数据库，精准度有待考量，需进行修正。

1.2.1　i-Tree 模型

i-Tree 模型由生态效益分析和行道树资源分析两大基础模块组成[20]，并逐渐扩展为针对不同区域效益分析的多个模块。其中，Eco 模块主要对城市森林的碳汇效益进行估算，Streets 模块主要对行道树碳汇效益进行估算，二者都可对城市绿地功能与生态价值进行量化呈现。应用步骤为选取样地，采集高精度数据，建立数据库，导入 i-Tree 模型进行计算。

在 i-Tree Streets 模块应用方面，刘朋朋等[21]对杭州西湖景区的 5 条行道树进行测量并量化其生态效益；多项研究表明，悬铃木年综合效益最强，枫杨在固碳增汇方面发挥重要作用[22]，且大树形、大冠幅的乔木贡献更大[23]。在 i-Tree Eco 模块应用方面，赵东亮和赵宏宇[24]通过测算发现乔木效益优于灌木，也有研究指出水杉在城市滨水区中发挥强大的固碳增汇效益[25]。以上研究均揭示出乔木在城市绿化中起到重要的固碳作用，也指出应增加各国物种气候数据库，便于提高研究精确度[26]。

1.2.2　CITYgreen 模型

CITYgreen 是基于 ArcView 平台开发的扩展模块，不仅能对树木生长进行模拟，还是集净化空气、碳储碳汇、暴雨缓排、节能等生态效益评价于一体的计算模型。CITYgreen 模型需结合选定区域的遥感影像或样地内林木的详细数据进行评估，适用于城市绿地的生态效益评估。

陈莉等[27]结合深圳市绿地 1990—2005 年的 4 段遥感影像，量化城市绿地的生态服务价值，结果表明，生态效益差异化与城市化进程呈现强关联性，与其他研究结论相吻合[28]。也有学者对不同土地利用类型、功能区进行测算，均发现绿地由于植被覆盖率高，固碳作用最强，生态效益最优[29-30]。还有研究发现，绿道固碳效益与绿地面积呈正相关关系[31]。以上研究均指出模型可为环境效益评估做出贡献，但使用模型时应根据本土情况调整参数，以减小误差[32-33]。

1.2.3　InVEST 模型

InVEST 作为国内外生态系统服务常用的评估模型之一[34]，其碳储量模块包含地上生物量、地下生物量、土壤和死亡有机物 4 个碳库，其数据常用样地清查或遥感反演进行获取，将 4 个碳库的碳密度相加，再与各类土地利用类型的面积相乘[35]，得到区域碳储量。还可结合 ArcGIS 进行空间制图，便于直观了解碳储量空间分布与演化模式，适用于国家、省份、流域等大尺度测算研究。

韩依纹等[36]结合政府公开的实测与遥感数据发现，韩国首尔市自然绿地的固碳更佳。有些学者结合 FLUS、PLUS 模型对未来碳储量演变规律进行模拟分析指出，不同土地利用类型导致碳汇能力的差异[37-39]。还有学者揭示出城市化进程中大面积占据林地、草地、耕地对碳储量的潜在影响[40]。

1.3　遥感反演法

遥感反演法是对卫星图像进行解译，运用软件进行处理或将实地调研的数据与计算公式结合，构建碳汇量与其单个或多个影响因子的综合模型[16]，以监测碳汇时空变化的方法。此方法适用于城市、区域等大尺度的绿地碳汇估算，在样地清查法基础上进行优化，具有实时动态性，可量化碳汇变化趋势，估算大尺度绿地碳库，但数据获取和处理较为复杂，工作量较大。

该方法通常运用 ENVI、ArcGIS 进行解译，结合归一化植被指数（NDVI）、植被净初级生产力（NPP）等植被基础数据进行多元回归线性模拟，并用 SPSS 分析因子间相关性以验证模型的精确度，从而测算碳汇量。殷炜达等[41]研究指出，碳储量与 NDVI 呈显著相关，绿地类型的不同导致碳汇量差异；Wei 等[42]发现，碳汇效益与 NPP 呈正相关关系；还有学者发现，增加平面与立面

绿量对于碳汇具有提升作用[43]，且灌木碳汇能力强于草本[44]。

1.4 涡度相关法

涡度相关法是以微气象学为原理的测算方法，通过通量观测塔结合三维超声风速仪、CO_2/H_2O 红外分析仪等精密仪器测定大气湍流中温度、气体的数据，计算其与垂直风速脉动的协方差[45]，从而求出该气体的通量值。同时也可对气体影响因子的数据进行采集，对两者关系进行相关性分析，探索气体变化的原因与提升或消减的方法。此方法的优势在于可实时评估绿地碳汇量的连续变化及其与气象因子的相关性，适用于中尺度观测，但该方法需借助精密设备测量，设备较为昂贵，且气候条件较为复杂，操作难度较大，稳定性较弱。

多项研究均围绕碳储量与温度、土壤、水分等环境因子间相关性展开，陈文靖等[46]研究发现，公园绿地季节性特征明显，植物生长季固碳，非生长季排碳，与多位学者研究结论一致[47-48]，还指出植物生长季可改善公园微气候[49]，且乔木对碳汇的贡献最大[50]，草本植物固碳能力较弱。

2 城市绿地碳汇测算方法比较

综上所述，4 种城市绿地碳汇测算方法均有各自的适用范围和优劣势（表 1）。样地清样法中的生物量法适用于微观尺度，生物量转换因子法适用于宏观、微观尺度；软件模拟法中的 i-Tree 与 CITYgreen 适用于中观、微观尺度、InVEST 适用于宏观尺度；遥感反演法适用于中观、宏观尺度；涡度相关法适用于中观尺度。生物量法应对测定树种建立特定异速生长方程，可进一步提升研究精度[51]，生物量转换因子法应针对不同区域设定参数、建立公式。软件模拟法中，i-Tree 与 CITYgreen 模型的不同地域数据还有待完善，需结合实测数据、物候条件调整参数[26,33]，目前常用 InVEST 模型评估城市绿地的生态系统服务[40,52]，但在微观尺度上仍有提升的空间和潜力，可结合样地清查法弥补植株尺度的不足。遥感反演法已被广泛运用于监测大尺度城市绿地碳汇能力[53]，为减小误差，多结合野外调查数据建立优化模型或对比验证其精确性[54]。涡度相关法对局部区域测算精度较高，也应考虑增强此方法的区域适用性[55]。

表 1 城市绿地碳汇测算方法比较

方法名称	计算方法/软件	适用范围	优势	劣势
样地清查法	生物量法	微观	方法明确，技术简单，可信度高，参数研究较为全面	选取优质绿地，数据存在高估，耗时耗力，不具有实时动态性
	生物量转换因子法	微观、宏观	方法成熟、应用面广	空间具有差异性，大范围计算存在误差，清查资源不全面
软件模拟法	i-Tree	微观、中观	操作便捷，针对不同乔木灌木，结果直观	数据库有待完善，本土使用参数有误差
	CITYgreen	微观、中观	操作简单、计算快速	不适用于灌木、缺乏本土数据库，需进行数据修正
	InVEST	宏观	操作简单，所需数据较少、结果可视化、适用范围广	空间数据不全，算法过程中有一定简化，信息不全
遥感反演法	利用遥感影像获取数据、结合调查数据，构建综合模型	中观、宏观	具有实时动态性、可量化大范围碳汇时空变迁	参数多，模型较为复杂，处理困难
涡度相关法	通过精密仪器测量气体数据，计算其与垂直风速脉动的协方差	中观	获取直观、连续数据，也可了解碳汇对气象因子响应过程	设备昂贵、观测时间长，对环境因子要求高，实际操作难度大

由于目前暂无通用类城市绿地碳汇测算方法，针对不同尺度的城市绿地碳汇计算应选取数据获取简单、操作便捷、结果直观、可信度高的方法，应全面考量样地、参数、公式的选择，这样才能使碳汇量计算更具精确性，碳汇效益评估更具说服力。在此基础上，有学者构建出城市绿地碳汇测算框架：根据城市绿地的 5 大分类，实地获取土壤、水体、乔木、灌木、草地 5 种要素的各项生物指标，建立生物量模型，分级监测碳汇量[56]。也有学者构建出基于遥感影像的绿地碳汇动态监测模型，通过识别不同树种、测算环境因子，揭示碳汇分布，预测碳汇量变化[57]。还有学

者构建了三维绿地碳汇测算模型[58]，弥补了二维视角的不足，进一步提高了碳汇测算精度。再者，将样地清查和遥感反演相结合的方法已陆续应用在碳汇测算研究之中，有学者将两种方法相结合，在 IPCC 的估算方法基础上，提出了针对城市总体规划的绿地系统碳汇计算方法并结合案例演练[59]，也有多位学者基于上述方法测算碳汇能力，探究碳汇量与环境因子间相关性，归纳提炼碳汇提升途径。

3　展望

城市绿地作为城市生态系统中重要组成部分，是发挥固碳增汇效益的空间载体。目前学术界在宏观层面主要探讨空间特征[60]、布局[61]对城市绿地碳汇的影响及其时空演变特征[62]；微观层面也对高固碳植被配置[63]、植被群落[64-65]、植被个体[66]展开研究与精确测算，然而针对多尺度碳汇测算及其差异化规划路径与提升策略研究有待进一步发展，也应加强理论成果向规划实践转化。

3.1　测算体系的不断完善

从已有研究来看，城市绿地碳汇测算方法较为繁杂，由于尚未构建出系统性、全面化测算体系，多尺度绿地碳汇测算的精准模型与具体方法还有待开发与研究，应完善对城市不同绿地类型的清查资源与数据统计，开发基于遥感卫星图像和本土数据库的绿地碳汇模型，软件可针对各绿地类型、规模及各类常见乔灌草植被进行不同季相、气候模拟、预测碳汇量，兼具实时、统计、计算、修正等功能，以及针对不同土地利用类型和人为活动进行更精细的区分测算，便于动态监测碳汇效益、量化碳汇能力。

因此，未来研究在健全碳汇评估体系的基础上，在全域尺度，可开展时间节点的纵向研究与不同城市间碳汇能力的横向比较，模拟绿地碳汇对碳中和的促进作用；在区域尺度，可针对不同绿地类型、布局、特征、质量对碳汇的影响机制展开细致化研究，分析碳汇能力差异化原因，也应重视立体维度的碳汇效益；在植株尺度，可测算本土优质植被碳汇能力，同时对配置高固碳乔灌草展开进一步探讨，从而提升城市绿地碳汇能力，揭示城市绿地在碳中和目标中的重要贡献。

3.2　规划实践的重要指引

测算绿地碳汇能力不仅能为城市规划提供科学指导，更是实现碳中和目标的重要支撑，还可对应各类规划实践结合公园城市、低碳城市建设等热点实践进行分区管控与布局优化。在政策响应方面，《中共中央　国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》中提出应“巩固生态系统碳汇能力，提升生态系统碳汇增量，还应提升城乡建设绿色低碳发展质量”，在区域层面，上海、广东等地提出了健全碳汇监测平台[67]、控碳排增碳汇[68]的低碳城市规划路径。国家、区域政策均反映出测算城市绿地碳汇的必要性与迫切性，动态监管城市碳汇将是未来工作的重要环节。建立碳汇数据库、监测平台、构建碳汇测算体系，可了解碳汇分布、掌握碳汇动态，实现城市绿地碳汇能力综合提升，更能为实现碳中和目标贡献力量。

在规划实践方面，评估多尺度碳汇能力，测算高精度碳汇效益不仅能有效监测碳汇、管控碳源，也能为绿地布局优化、植被群落配置提供新思路，能为决策者制定规划部署提供科学依据，有助于实现高、低碳汇区域的针对性管理，发挥多部门间协同作用，以期能为城市绿色低碳可持续发展注入新活力。城市绿地稳定固碳、持续增汇是实现碳中和的内驱力之一。

参考文献

[1]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(4):1-5.

[2]褚芷萱,马锦义,邵海燕,等.不同应用类型园林树木固碳能力[J].中国城市林业,2022,20(1):126-129.

[3]DENG L F,YUAN H R,XIE J,et al.Herbaceous plants are better than woody plants for carbon sequestration [J]. Resources, Conservation and Recycling,2022,184:106431.

[4]AMOATEY P,SULAIMAN H.Quantifying carbon storage potential of urban plantations and landscapes in Muscat, Oman [J]. Environment,Development and Sustainability,2020,22(8):7969-7984.

[5]王敏,宋昊洋.影响碳中和的城市绿地空间特征与精细化管控实施框架[J].风景园林,2022,29(5):17-23.

[6]郭晖,周慧,张家洋.郑州市 15 种常见园林树种固碳释氧能力分析研究[J].西北林学院学报,2017,32(4):52-56.

[7]殷鸣放,杨琳,殷炜达,等.森林固碳领域的研究方法及最新进

展[J].浙江林业科技,2010,30(6):78-86.
[8]周健,肖荣波,庄长伟,等.城市森林碳汇及其核算方法研究进展[J].生态学杂志,2013,32(12):3368-3377.
[9]王迪生.北京城区园林植物生物量的计测研究[J].林业资源管理,2009(4):120-125.
[10]SHADMAN S, KHALID P A, HANAFIAH M M, et al. The carbon sequestration potential of urban public parks of densely populated cities to improve environmental sustainability[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 52: 102064.
[11]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.
[12]鲁敏,高鑫,纪园园,等.济南市中心城区绿地固碳释氧能力研究[J].山东建筑大学学报,2017,32(6):511-516.
[13]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.
[14]李源清,张晓东,胡娜,等.基于统计数据郑州市全口径碳汇估算研究[J].计量学报,2022,43(2):281-286.
[15]欧强新,李海奎,雷相东,等.基于清查数据的福建省马尾松生物量转换和扩展因子估算差异解析:3种集成学习决策树模型的比较[J].应用生态学报,2018,29(6):2007-2016.
[16]方精云,郭兆迪,朴世龙,等.1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算[J].中国科学(D辑:地球科学),2007,37(6):804-812.
[17]于洋,王昕歌.面向生态系统服务功能的城市绿地碳汇量估算研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2021,53(1):95-102.
[18]殷楠,王帅,刘焱序.生态系统服务价值评估:研究进展与展望[J].生态学杂志,2021,40(1):233-244.
[19]吴哲,陈歆,刘贝贝,等.InVEST模型及其应用的研究进展[J].热带农业科学,2013,33(4):58-62.
[20]韩明臣,李智勇.城市森林生态效益评价及模型研究现状[J].世界林业研究,2011,24(2):42-46.
[21]刘朋朋,蔡建国,章毅,等.基于i-Tree模型的杭州市环西湖景区行道树生态效益分析[J].科技通报,2019,35(2):132-137.
[22]熊金鑫,祁慧君,王倩茹,等.基于i-Tree模型的城市小区行道树生态效益评价[J].南京林业大学学报(自然科学版),2019,43(2):128-136.
[23]宋思贤.校园行道树生态效益分析及信息管理系统构建[D].杨凌:西北农林科技大学,2022.
[24]赵东亮,赵宏宇.基于i-Tree Eco模型的城市森林生态效益评估:以长春水文化生态园为例[J].智能建筑与智慧城市,2022(2):146-148.
[25]刘利,李想,刘秉涛.基于i-tree模型的城市滨河绿化带生态效益评估:以淮安市古黄河景观带为例[J].环境生态学,2021,3(2):27-34.
[26]邱雯婉,张敏霞,鲍沁星.i-Tree模型在城市森林景观绩效量化中的应用评析[J].浙江林业科技,2019,39(5):106-116.
[27]陈莉,李佩武,李贵才,等.应用CITYGREEN模型评估深圳市绿地净化空气与固碳释氧效益[J].生态学报,2009,29(1):272-282.
[28]凌焕然,王伟,樊正球,等.近二十年来上海不同城市空间尺度绿地的生态效益[J].生态学报,2011,31(19):5607-5615.
[29]胡志斌,何兴元,陈玮,等.沈阳市城市森林结构与效益分析[J].应用生态学报,2003,14(12):2108-2112.
[30]彭立华,陈爽,刘云霞,等.Citygreen模型在南京城市绿地固碳与削减径流效益评估中的应用[J].应用生态学报,2007,18(6):1293-1298.
[31]徐容容,江璐明,陈水森,等.基于CITYgreen模型的绿道生态效益评价:以增城市为例[J].广东农业科学,2013,40(17):173-176,4.
[32]占珊,闫文德,田大伦.基于CITYgreen的城市森林生态效益评估的应用[J].中南林业科技大学学报,2008,28(2):137-143.
[33]张陆平,王婷婷.CITYgreen模型在城市绿地生态效益研究中的应用[J].改革与开放,2018(3):42-43,52.
[34]黄从红,杨军,张文娟.生态系统服务功能评估模型研究进展[J].生态学杂志,2013,32(12):3360-3367.
[35]刘洋,张军,周冬梅,等.基于InVEST模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究[J].生态学报,2021,41(10):4052-4065.
[36]韩依纹,张舒,殷利华.大都市区绿地碳储存能力及其空间分布特点探究:以韩国首尔市为例[J].景观设计学,2019,7(2):55-65.
[37]林彤,杨木壮,吴大放,等.基于InVEST-PLUS模型的碳储量空间关联性及预测:以广东省为例[J].中国环境科学,2022,42(10):4827-4839.
[38]姚龙杰,岳邦瑞,潘卫涛等.县域碳储量时空演变与多情景模拟:基于FLUS和InVEST模型[J].中国城市林业,2023,21(5):152-158.
[39]刘晓娟,黎夏,梁迅,等.基于FLUS-InVEST模型的中国未来土地利用变化及其对碳储量影响的模拟[J].热带地理,2019,39(3):397-409.
[40]HE C Y, ZHANG D, HUANG Q X, et al. Assessing the potential impacts of urban expansion on regional carbon storage by linking the LUSD-urban and InVEST models[J]. Environmental Modelling & Software, 2016, 75:44-58.
[41]殷炜达,苏俊伊,许卓亚,等.基于遥感技术的城市绿地碳储量估算应用[J].风景园林,2022,29(5):24-30.
[42]WEI X D, YANG J, LUO P P, et al. Assessment of the variation and influencing factors of vegetation NPP and carbon sink capacity under different natural conditions[J]. Ecological Indicators, 2022, 138:108834.
[43]杨鑫,高雯雯,李莎,等.基于遥感影像估算的北京中心城区

碳储量与气候环境关联性研究[J].风景园林,2022,29(5):31-37.

[44]曹晓裴,林殷怡,杜鹏宇,等.高光谱遥感数据下城市植被碳汇的研究[J].科技与创新,2016(16):11-13.

[45]陈世苹,游翠海,胡中民,等.涡度相关技术及其在陆地生态系统通量研究中的应用[J].植物生态学报,2020,44(4):291-304.

[46]陈文婧,李春义,何桂梅,等.北京奥林匹克森林公园绿地碳交换动态及其环境控制因子[J].生态学报,2013,33(20):6712-6720.

[47]王亚军,郁珊珊.城市绿地生态系统碳交换动态及其与环境控制因子的关系[J].草业科学,2017,34(5):966-974.

[48]孙春健,王春林,申双和,等.珠三角城市绿地 CO_2 通量的季节特征[J].生态学报,2012,32(4):269-278.

[49]王修信,朱启疆,陈声海,等.城市公园绿地水、热与 CO_2 通量观测与分析[J].生态学报,2007,27(8):3232-3239.

[50]王修信,朱启疆,陈声海,等.北京市海淀公园绿地 CO_2 通量变化特征[J].应用基础与工程科学学报,2011,19(1):166-172.

[51]YOON T K,PARK C W,LEE S J,et al.Allometric equations for estimating the aboveground volume of five common urban street tree species in Daegu, Korea[J]. Urban Forestry & Urban Greening,2013,12(3):344-349.

[52]JIANG W G,DENG Y,TANG Z H,et al.Modelling the potential impacts of urban ecosystem changes on carbon storage under different scenarios by linking the CLUE-S and the InVEST models[J].Ecological Modelling,2017,345:30-40.

[53]张晓娟,李东杰,刘思含,等.遥感技术在“双碳”目标实现中的应用进展[J].航天返回与遥感,2022,43(6):106-118.

[54]RICHARDSON J J,MOSKAL L M.Uncertainty in urban forest canopy assessment: lessons from Seattle, WA, USA[J]. Urban Forestry & Urban Greening,2014,13(1):152-157.

[55]同小娟,张劲松,孟平.基于涡度相关法的森林生态系统碳交换及其控制机制[J].温带林业研究,2018,1(2):1-9,14.

[56]张桂莲,邢璐琪,张浪等.城市绿地碳汇计量监测方法研究进展[J].园林,2022,39(1):4-9+49.

[57]周坚华,胡永红,周一凡,等.城镇绿地植被固碳量遥感测算模型的设计[J].生态学报,2010,30(20):5653-5665.

[58]吴宁,李王鸣,冯真,等.基于三维视角的城乡绿色碳汇参数化评估模型[J].城市规划,2016,40(5):91-98.

[59]和晓彤.面向总体规划阶段的城市绿地碳汇量估算方法研究:以西安市中心城区为例[D].西安:西安建筑科技大学,2021.

[60]王敏,朱雯.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[J].园林,2021,38(10):11-18.

[61]王晶懋,高洁,孙婷,等.双碳目标导向下的绿色生态空间碳汇能力优化设计[J].中国城市林业,2023,21(4):33-42.

[62]王天福,龚直文,邓元杰.基于土地利用变化的陕西省植被碳汇提质增效优先区识别[J].自然资源学报,2022,37(5):1214-1232.

[63]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.

[64]依兰,王洪成.城市公园植物群落的固碳效益核算及其优化探讨[J].景观设计,2019(3):36-43.

[65]WANG Y N,CHANG Q,LI XNY.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.

[66]LU C Y,KOTZE D J,SETÄLÄ H M.Evergreen trees stimulate carbon accumulation in urban soils via high root production and slow litter decomposition[J].Science of the Total Environment,2021,774:145129.

[67]荆贝贝,杜安.上海城市绿色空间碳汇评估及提升策略[J].中国国土资源经济,2022,35(4):64-72.

[68]李禅,肖百霞.国土空间规划中广东省“碳达峰、碳中和”目标的传导路径研究[J].规划师,2022,38(7):66-71.