

城市绿地碳汇计量监测方法研究进展

Summary on the Monitoring Methods of Carbon Sequestration in Urban Green Space

张桂莲* 邢璐琪 张浪* 仲启铨 易扬
ZHANG Guilian* XING Luqi ZHANG Lang* ZHONG Qicheng YI Yang

(上海市园林科学规划研究院, 城市困难立地生态园林国家林业和草原局重点实验室, 国家林业和草原局城市困难立地绿化造林国家创新联盟, 上海城市困难立地绿化工程技术研究中心, 上海 200232)

(Shanghai Academy of Landscape Architecture Science and Planning, Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Ecological Landscaping of Challenging Urban Sites, National Innovation Alliance of National Forestry and Grassland Administration on Afforestation and Landscaping of Challenging Urban Sites, Shanghai Engineering Research Center of Landscaping on Challenging Urban Sites, Shanghai, China, 200232)

文章编号: 1000-0283(2022)01-0004-06
DOI: 10.12193/j.laing.2022.01.0004.001
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2021-11-28
修回日期: 2021-11-29

摘要

城市化区域是CO₂等温室气体的主要排放来源。城市绿地作为城市范围内唯一直接增汇、间接减排要素, 精准监测其碳汇能力、分析其影响因素, 能直观反映城市绿地的碳中和作用, 这对增强城市绿地碳汇功能, 促进城市低碳发展具有重要意义。研究梳理了多种城市绿地碳汇计量监测方法, 主要有样地清查法、同化量法、微气象法、遥感估测法等, 分析前人运用上述方法对不同尺度、类型城市绿地进行碳汇计量的研究成果, 总结各方法的适用范围与尺度、优势与不足。在此基础上, 针对城市绿地特征提出了不同尺度、不同方法相结合的城市绿地碳汇计量监测思路与框架, 以期推进城市绿地碳汇的精确评估, 为城市精细化管理、碳中和目标的实现提供理论和技术支撑。

关键词

城市绿地; 碳储量; 碳汇; 样地清查; 遥感监测; 城市绿地碳汇计量监测框架

Abstract

The urbanized region is a major source of CO₂ and other greenhouse gases. Urban green space is the only element in the city to increase carbon sequestration directly and reduce emission indirectly. Monitoring the carbon sequestration of urban green space accurately and analyzing its influencing factors, can intuitively reflect the carbon neutralization of urban green spaces, which is of great significance to enhance carbon sequestration function of urban green space and promote urban low-carbon development. In this paper, the various methods of carbon sinks measurement and monitoring in urban green space are sorted out, mainly including sample inventory, photosynthetic rate integration, micrometeorology evaluation and remote sensing estimation. This paper analyzes the previous research results of carbon sink monitoring on different scales and different types of urban green space, and summarizes the applicable scale, advantages and disadvantages of these methods. For the characteristics of urban green space, this study put forward the framework of measuring and monitoring urban green space carbon sinks with different scales and different methods to promote the precise assessment of urban green space carbon sinks, and provide theoretical and technical support for the implementation of urban refined management and carbon neutrality.

Keywords

urban green space; carbon storage; carbon sequestration; sample inventory; remote sensing estimation; the framework for measuring and monitoring urban green space carbon sinks

张桂莲

1976年生/女/山西太原人/博士/高级工程师/研究方向为林业碳汇计量监测、城市绿地生态系统网络研究

邢璐琪

1993年生/女/山西定襄人/硕士/助理工程师/研究方向为林业碳汇

张浪

1964年生/男/安徽人/博士/教授级高级工程师, 博士生导师/上海领军人才、享受国务院特殊津贴专家/研究方向为生态园林规划设计与技术研究/本刊主编

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: 371209698@qq.com; zl@shsyky.com

基金项目:

上海市科委工程技术研究中心建设专项“上海城市困难立地绿化工程技术研究中心”(编号: 16dz2251400); 上海市科技计划项目“城市绿地碳汇计量监测技术标准研究与应用示范”(编号: 21DZ2206600); 上海市科技计划项目“上海‘四化’生态网络空间综合评价与质量提升关键技术研究及集成示范”(编号: 19DZ1203301)

城市化区域人口高度密集,化石能源利用强度高,土地利用变化剧烈,是CO₂等温室气体的主要排放来源^[1]。据统计,中国城市碳排放量占全国总量的90%^[2]。城市绿地作为城市生态系统的重要组成部分,是城市生态环境可持续发展的基础。作为城市范围内唯一直接增汇、间接减排要素^[3],城市绿地不仅能够通过植物群落进行自然固碳,还可以通过调节小气候、涵养水源、吸收污染物等生态效益的发挥减少城市的总体能耗,间接降低城市碳排放^[4]。城市绿地的自然固碳,即城市绿地碳汇,是指城市绿地中的绿色植物通过光合作用吸收大气中的CO₂并固定在植被与土壤中,从而减少大气中CO₂浓度的过程^[5]。准确监测城市绿地碳汇的时空分布,分析其影响因素,对于增强城市绿地碳汇功能,促进城市生

态可持续发展,直观反映城市绿地应对气候变化价值具有重要的指导作用。

随着城市化进程的深入,城市土地利用规划趋于饱和,城市绿地存在扩张困难、生态空间匮乏的问题;同时,城市区域高度异质性,城市绿地空间分布格局相对复杂,绿地物种丰富度高、群落结构复杂,空间分布破碎,相较于一般森林,城市绿地时空分布的精准获取、状态变化的可视化感知存在一定难度;另外,城市绿地人为扰动程度高,城市环境建设及人居要求对其生态服务功能的需求更高更全面,而城市森林碳汇功能评估方法众多,标准不统一,评估对象多有不同,尺度参差不齐,城市绿地碳汇功能的科学评价、对比分析方面存在诸多技术难题。

近年来,相关学者对城市绿地碳汇的计

量监测已开展了许多研究,但总体上仍主要参照森林碳汇的计量监测方法,缺乏专门针对城市绿地的技术标准。文章梳理和比较了城市绿地碳汇的计量监测方法(表1),分析了前人对城市绿地监测的研究成果,构建了不同尺度及方法相结合的针对城市绿地的碳汇计量监测框架,以期推进城市绿地碳汇监测技术的发展及标准指南的制定,为规划、设计和建设面向碳中和的城市绿地提供理论和技术参考。

1 城市绿地碳汇计量监测方法

1.1 样地清查法

样地清查法是通过建立典型样地对植被及土壤碳储量进行实测,并结合连续观测来获取一定时期内碳储量的变化情况^[5]。该方法通常在推算生物量后乘以含碳系数来求得

表1 城市绿地碳汇监测方法
Tab.1 The monitoring methods of urban green space carbon sinks

方法 Method	所需数据 Required data	方法或模型 Method/model	适用范围或尺度 Applicable scope/scale	优势 Strength	不足 Deficiency
样地清查法	平均生物量法	标准木解析、异速生长方程等	植株尺度	采用标准木解析法直接测量生物量准确度高;异速生长方程方便快捷	标准木解析法工作量及人力物力消耗较大;异速生长方程需大量实测数据,同时需考虑树种生长阶段性、地域性差异
	生物量转换因子法	森林资源清查数据等	区域甚至国家尺度	方法相对成熟	需测定不同地区、不同树种的转换因子等参数
	模型测算法	植被类型属性、植被数量或面积、植被周边环境等	CITYgreen、i-Tree、InVEST等	植株尺度、区域尺度	操作简单,计算快捷,估算全面
同化量法	净光合速率、蒸腾速率、胞间CO ₂ 浓度、气孔导度、叶面积、绿量等	便携式光合仪、叶面积仪等	植株尺度	可用于评价不同植物固碳能力强弱、筛选高碳汇物种、分析植物光合作用影响因子等	存在碳汇量估算上的不确定性
微气象法	CO ₂ 通量数据	涡度相关技术等	点尺度(均匀下垫面区域)观测	可获取连续、准确的观测数据	须考虑城市绿地下垫面是否均匀、观测辐射范围、通量塔或移动通量站布设等问题
遥感估算法	反演估算	不同拟合方法(线型回归、机器学习等)构建拟合模型	区域尺度	快速、实时实现大范围碳汇估算	需进行城市绿地提取及分类,考虑高分、高光谱遥感数据的应用
	模型模拟	遥感影像数据、气象数据、生理生态参数等	CASA、BEPS、BI-OME-BGC等	区域尺度	快速、实时实现大范围碳循环等模拟

碳储量,主要包括平均生物量法、生物量转换因子法和模型测算法。

平均生物量法是基于实测样地的平均生物量与该类型绿地面积来求取绿地生物量的方法。其中,采用标准木解析法直接测量生物量准确度高,如王迪生^[6]采用平均标准木法测算出北京城区园林绿地总碳储量为371.16万t,城区年碳汇量约为4.5万t;林雯等^[7]结合样方调查和解析木测定方法,得出广州市城市森林不同林分单位面积碳储量大小依次为马占相思(283.95t)、紫荆(262.99t)、木荷(244.92t)、马尾松(224.09t)、桉树(166.28t)、杉木(157.66t)。标准木解析法对于物种丰富度极高的城市绿地而言,工作量及人力物力消耗较大,在城市区域尺度中应用较困难,在实际应用中,通常基于标准木解析法得到的高精度实测数据,构建胸径(树高)—生物量回归方程(如异速生长方程)进行树木生物量的估测^[8-9]。

生物量转换因子法是根据蓄积量与生物量的比值关系,基于资源清查数据,统计数据中林分的总蓄积量得到生物量,被广泛用于区域乃至国家尺度上植被生物量、碳储量及其动态变化的评估^[10]。赖广梅等^[11]采用生物量转换因子连续函数法对东莞市大岭山城市森林公园的植物碳汇能力进行了分析,研究表明森林公园年碳汇量为7.34 t/hm²;仲启铨等^[12]采用转换因子连续函数法估算上海全市乔木林生物量为4.828×10⁶ t;Ren等^[13]基于森林资源清查数据和生物量转换因子法,对厦门城市森林1972—2006年间的碳储量变化进行了估算。采用生物量转换因子法进行城市绿地碳储量、碳源/汇的动态监测,需考虑不同地区、不同物种之间转换因子等参数的差异,参数的“适地适树”是提升生物量转换因子法估测精度的关键。

模型测算法是基于样地实测的树木信

息,模拟树木生长或直接建立树木模型,通过输入植被信息或通过遥感影像识别植被,从而对碳汇量进行估算^[14],常用的模型包括CITYgreen、i-Tree、The Pathfinder、NTBC、InVEST等。对单株植物来说,The Pathfinder和NTBC可进行年碳汇量估算^[14];i-Tree模型适用于街头绿地、行道树等斑块尺度绿地碳汇量估算^[15];针对城市森林、城市公园等区域尺度绿地的碳汇估算,多采用CITYgreen模型^[16];在城市区域尺度,InVEST模型考虑土地利用/覆被与碳储量的关系^[17]。模型测算法相比传统估算方法,可极大节约人力物力,使运算更加快速高效;同时,模型根据植被自身属性模拟树木生长状态,碳储量、碳源/汇估算精准度较高,在城市绿地生态系统服务功能评价应用广泛。

1.2 同化量法

同化量法即通过测定植物叶片光合生理指标,如净光合速率、蒸腾速率、胞间CO₂浓度、气孔导度等,计算植被净同化总量、净固碳量,结合叶面积、绿量等结构参数得到植物固碳量,常用于在小尺度上评价不同植物固碳能力强弱、筛选高碳汇物种、分析植物光合作用影响因子等。

相关学者基于同化量法就城市绿地物种碳汇能力开展了许多研究,为不同地区高碳汇树种选择提供了参考^[18-19]。利用同化量法测定不同尺度,如叶片、植物单株、单位面积的固碳能力,结合植被生理参数(叶面积、绿量、冠层结构等)、绿地面积等数据实现绿地尺度固碳量的测算,如王忠君等^[20]测定了福州植物园28种主要植物的叶面积指数和光合指标,结合林业二类清查数据测算植物园各类植被的绿量值、固碳量,对植物园植被的固碳释氧效应进行了量化研究;吴婕等^[21]通过深圳特区城市植被优势植物光合作用参数测

定,结合大范围样方调查和遥感观测,推算出深圳城市不同绿地类型的固碳释氧效应及其时空特征。

虽然利用同化量法实现城市绿地碳汇监测的研究已经开展了许多,但该方法存在一定的不确定性,如温度、降水等环境因子对光合速率的影响,相同树种不同生长阶段的光合速率差异,叶片尺度的固碳量推算到整株甚至绿地尺度等都会引起不确定性,从而影响碳汇监测结果^[22]。

1.3 微气象法

微气象法通过测量近地层湍流状况和被测气体的浓度,从而获得该气体的通量值^[23]。该方法以小气候特征监测为基础,可直接对绿地与大气之间的CO₂通量进行连续、动态的观测,广泛应用于碳通量变化及其环境响应机理的研究^[24]。代表性方法是湍度协方差法,如陈文婧等^[25]于2011—2012年对北京奥林匹克森林公园进行碳通量观测,发现该公园绿地全年净生态系统生产力为164 g·C/m²;李霞等^[26]对北京海淀公园的CO₂通量观测数据分析表明,海淀公园绿地年净生态系统生产力为8.7554 t·C/hm²;孙春健等^[27]分析2009、2010年东莞市植物园内的CO₂通量定位观测数据,表明年平均净生态系统交换量总量为104.2 g·C/m²。

尽管湍度协方差法可以直接、连续、准确地观测绿地的碳汇能力,但该方法对下垫面的要求很高^[28]。有研究表明,在复杂地形和大气不稳定地点测定的生态系统碳吸收与其他方法的结果差别高达80%~100%^[29];同时,湍度协方差法是点尺度观测方法,在某个站点得到的结果难以外推至其他站点^[30]。对于空间异质性较高的城市区域及城市绿地而言,须考虑城市绿地下垫面是否均匀,观测辐射范围、通量塔或移动通量站布设等问题,从而进

一步开展基于涡度相关城市绿地碳源/汇动态监测。

1.4 遥感估算法

遥感技术具有快速、实时、大范围获取数据的优势,应用分析遥感数据产品,或以遥感影像为数据源结合实地调查数据、驱动模型是实现碳储量、碳循环、碳源/汇监测的有效方法。目前,碳汇动态监测相关遥感卫星及数据产品经过长足发展,已具有良好的应用潜力^[31]。基于遥感技术开展碳汇估算,主要有两种方法:反演估算、模型模拟。

通过遥感反演方法开展碳汇估算是对遥感影像数据和实测碳储量数据进行相关性分析,建立两者的拟合方程,进而获取城市绿地碳储量的时空分布及动态^[32]。城市绿地的空间分布格局及其功能需求相对复杂,决定其生物量的环境因子和生物因子多种多样,在这种情况下,单一遥感信息很难准确反映生物量的变化^[33]。许多学者基于多源遥感信息,如不同影像的波段灰度值、植被指数、纹理信息等进行变量筛选与拟合,实现了城市绿地碳储量、碳动态的估算,如汤煜等^[34]基于遥感植被覆盖度数据建立了沈阳城市绿地地上碳储量(aboveground carbon, AGC)估算模型,结果表明沈阳城市绿地AGC总量为1.437 Tg; Yao等^[35]采用多种遥感植被指数建立城市绿地AGC的回归方程,发现2004年到2010年西安市环城公路内城市绿地AGC年均增长8 796 t; 徐丽华等^[36]对50个遥感因子进行筛选,建立义乌市不同城市森林类型的遥感碳储量估算模型,研究表明公园森林、防护森林、单位附属森林和其他森林的碳储量分别为3 623.80 t、5 245.78 t、5 284.84 t、5 343.65 t。

城市绿地空间异质性强、物种丰富度高,对城市绿地碳储量的估算往往会涉及物种尺

度甚至单株尺度。然而,基于遥感技术的城市绿地物种识别存在模型限制问题,如线性回归模型普遍存在预估精度不高、模型泛化能力差、估算结果残差线性相关等问题^[37];其次,生物量、碳储量的估算存在饱和现象^[32],往往会造成生物量估测的低值高估与高值低估问题,影响遥感估算精度。对于以上问题,一些学者利用机器学习模型等提高了线性多变量模型的预估精度,如谭一凡等^[38]采用KNN方法对深圳市森林碳分布进行模拟,得到碳估测最大值为309 Mg/hm²; 陆超等^[39]利用随机森林算法建立温州市主城区绿地生物量估算模型,发现城市绿地总生物量从2005年的223 783.80 t增加至2015年的405 191.09 t; 邱布布等^[40]利用逐步回归和随机森林算法建立杭州市绿地地上生物量估算模型,结果表明,城市绿地生物量随机森林模型R² (0.643)较逐步回归模型 (0.514)有所提高。同时,还有学者将混合效应模型应用于生物量、碳储量的模拟,缓解了饱和后估值抬高的影响,提高了模拟精度^[41]。

城市绿地提取及分类是进行碳储量、碳汇量估算的前提。城市区域高度异质性,绿地破碎程度高,植被类型多样性高,人为扰动程度高,因而相较于天然森林,利用遥感技术进行城市绿地精准提取、碳储量精确估算有更多的难点,如城市绿地的提取与碳储量估算需要更高空间分辨率以解决中低分辨率混合像元问题^[42],同时考虑到椒盐噪声问题,需对空间分辨率尺度进行研究^[43];需要更高的光谱分辨率以应对物种多样性及光谱相似性问题^[44];需采用激光雷达等新型遥感技术开展树种识别、三维建模等研究^[45]。上述难点部分已开展了一定研究并取得相应成果, Sun等^[46]采用SPOT6高分辨率影像,估算北京市城市绿地碳储量总量为956.3 Gg; Chen等^[47]利用Google

Earth高分辨率影像更精确地匹配了青岛市城阳街道绿地样地,提高了估算精度,得出了不同绿地类型的碳密度空间分布;申鑫等^[48]利用机载LiChy传感器获取高光谱和高空间分辨率数据,融合高光谱数据光谱特征变量和高空间分辨率数据单木冠幅统计变量,构建多元回归模型估算生物量,结果表明通过集成高光谱和高空间分辨率数据的生物量反演效果有所提升。

通过模型模拟开展城市绿地碳汇监测,主要有参数模型和过程模型。参数模型也称为半经验模型,即在收集到各类相关参数的基础上,利用经验公式来求解碳通量大小,如常用的光能利用模型CASA。许多学者已经基于CASA模型和遥感影像数据对城市绿地生态系统NPP、固碳量等进行了估算^[49]。过程模型是以森林生态系统生理生态过程为基础,从机理上模拟植被光合作用、蒸腾作用和呼吸作用,以及它们与环境之间的物质和能量交换过程,从而实现生态系统碳循环及其对气候环境变化和对人为干扰响应过程的模拟,主要有TEM模型、CENTURY模型、BIOME-BGC模型、BEPS模型等。过程模型基于生理生态机理建模,在碳循环等模拟中具有明显优势,在森林碳循环、碳源/汇动态的研究中已被广泛采用^[50-52]。然而,由于模型本身的复杂性和不确定性、驱动数据的多样性、遥感数据的标准化以及适用于大尺度模拟的局限性,基于过程模型的城市绿地碳源/汇研究较少。

2 城市绿地碳汇计量监测思路与框架

目前,尽管有许多方法被用于监测或估算城市绿地碳汇能力,但多数仍参照森林碳汇的计量监测方法,缺乏专门针对城市绿地碳汇的监测技术或标准。而城市绿地相关的标准多集中于绿地分类、植物配置、养护管理

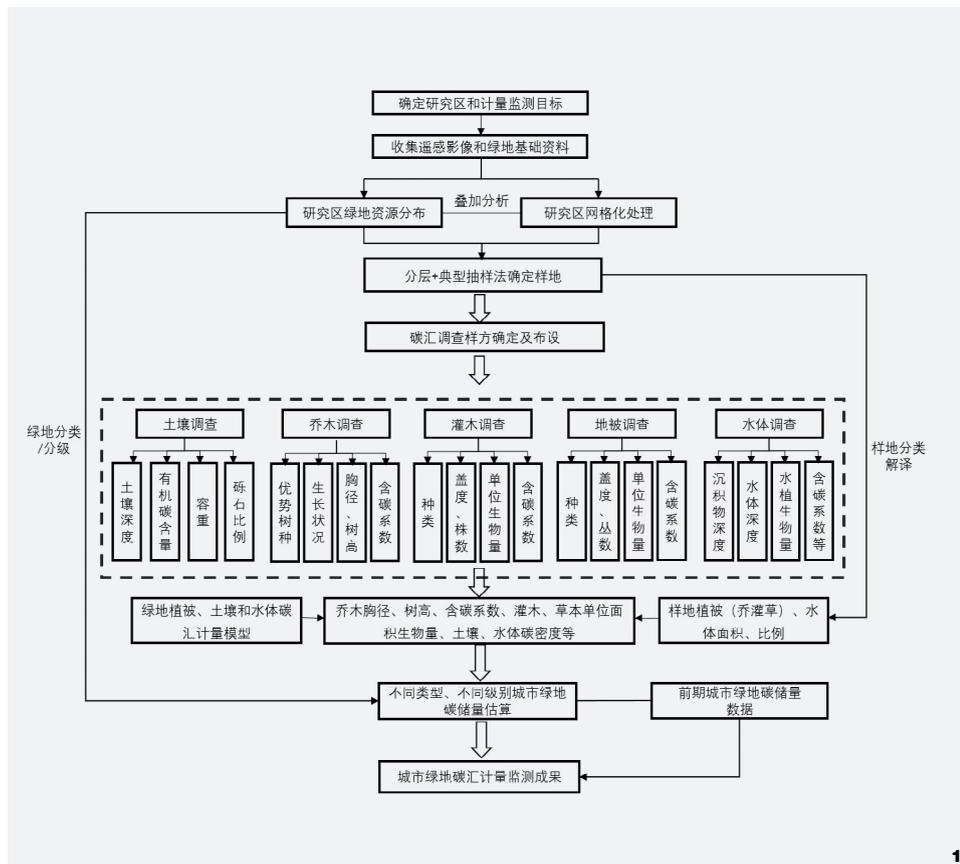


图1 城市绿地碳汇计量监测框架
Fig. 1 The framework for measuring and monitoring urban green space carbon sinks

及设计规范等方面，如《城市绿地设计规范》(GB50420-2007)、《城市绿地分类标准》(CJJ/T85-2017)、《城市绿地植物配置技术规范》(DB13/T2574-2017)、《城市绿地养护管理质量标准》(DB3301/T0286-2019)等。与碳汇相关性较强的技术标准多集中在林业领域，国际上主要有IPCC编制的《关于土地利用、土地利用变化和林业方面的优良做法指南》，国内主要有国家林业和草原局、自然资源部的行业标准及上海、北京、黑龙江、山东、广东、广西的地方标准，如《林业碳汇计量监测术语》(LY/T3253-2021)、《造林项目碳汇计量监测指南》(LY/T2253-2014)、《林业碳汇计量监测技术规程》(DB11/T953-2013)、《城市森林碳汇调查及数

据采集技术规范》(DB31/T1232-2020)等。对于如何准确、定量估算城市绿地碳汇的总量、组分和分布，尚没有制定统一有效的计量技术标准体系和实施范式。

在分析前人采用样地清查法、同化量法、微气象法和遥感估测法对城市绿地碳汇进行分析研究的基础上，本文提出了专门针对城市尺度的绿地碳汇计量监测思路和框架(图1)。首先，根据中国城市绿地的内涵、类型和结构功能特征，结合城市绿地分类，进行网格化布点，确定基于公园绿地、防护绿地、广场用地、附属绿地和区域绿地5大类型的抽样面积及监测样地；其次，对样地组成进行分类解译与实地调查，主要分为乔木层、灌木层、地被层、土

壤和水体5类，开展不同分层的碳库调查与参数测定，构建生物量关系模型；最后，根据尺度转换技术，获得不同样地、不同绿地类型的单位面积碳储量，实现城市绿地碳储量和碳汇量的估算。

3 结语

准确计量及评估城市绿地碳汇能力，对推进城市“碳达峰、碳中和”工作，建设绿色、低碳的可持续发展城市具有重要意义。基于城市绿地增汇减排的现实需求，未来对绿地碳汇计量技术的研究和运用，可从精准计量、技术体系和标准建设、智能化管理技术研建等方面开展，明确不同尺度城市绿地的碳库、碳汇参数调查监测和数据收集方法，完善不同碳库碳储量和碳汇量计量体系；结合样地测定与遥感估测、大数据等手段，开发相应的模型或算法，以估算城市绿地的碳汇能力。另外，借鉴国内外相关碳汇绩效监测和评估信息系统，研发用于全流程监测和管理的城市绿地碳汇效益信息系统，实现城市绿地碳汇现状评估、情景分析和模拟预测，支撑城市绿地规划、建设和管理全过程，为2060碳中和目标的实现提供科学指导。 [1][2][3]

参考文献

- [1] 罗鑫玥, 陈明星. 城镇化对气候变化影响的研究进展[J]. 地球科学进展, 2019, 34(9): 984-997.
- [2] 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.
- [3] 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.

- [4] 薛雪, 张金池, 孙永涛, 等. 上海常绿树种固碳释氧和降温增湿效益研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2016, 40(03): 81-86.
- [5] 童家靖, 黄伟, 黎秀琼, 等. 我国园林绿地的碳汇研究进展[J]. 热带生物学报, 2018, 9(01): 117-122.
- [6] 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(04): 120-125.
- [7] 林雯, 李聪颖, 周平. 广州城市森林六种典型林分碳积累研究[J]. 生态科学, 2019, 38(06): 74-80.
- [8] 袁位高, 江波, 葛永金, 等. 浙江省重点公益林生物量模型研究[J]. 浙江林业科技, 2009, 29(02): 1-5.
- [9] 张希金, 冷寒冰, 赵广琦, 等. 上海4种常见绿化树种地上生物量模型构建[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, 42(02): 141-146.
- [10] 张茂震, 王广兴. 浙江省森林生物量动态[J]. 生态学报, 2008(11): 5665-5674.
- [11] 赖广梅. 大岭山城市森林公园在东莞低碳城市建设中的碳汇能力[J]. 林业资源管理, 2010(03): 34-38.
- [12] 仲启斌, 傅煜, 张桂莲. 上海市乔木林生物量估算及动态分析[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36(03): 524-532.
- [13] REN Y, WEI X, WEI X H, et al. Relationship Between Vegetation Carbon Storage and Urbanization: A Case Study of Xiamen, China[J]. Forest Ecology and Management, 2011, 261(7): 1214-1223.
- [14] 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(01): 95-102.
- [15] 张玉阳, 周春玲, 董运高, 等. 基于i-Tree模型的青岛市南区行道树组成及生态效益分析[J]. 生态学杂志, 2013, 32(07): 1739-1747.
- [16] 徐飞, 刘为华, 任文玲, 等. 上海城市森林群落结构对固碳能力的影响[J]. 生态学杂志, 2010, 29(03): 439-447.
- [17] 郭旭东, 常青, 刘筱, 等. 基于碳储量视角的城镇土地利用模式与生态效益分异特征[J]. 中国土地科学, 2017, 31(04): 61-70.
- [18] 张娇, 施拥军, 朱月清, 等. 浙北地区常见绿化树种光合固碳特征[J]. 生态学报, 2013, 33(06): 1740-1750.
- [19] 薛海丽, 唐海洋, 李廷明, 等. 北京常见绿化植物生态调节服务研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2018, 54(04): 517-524.
- [20] 王忠君. 福州植物园绿量与固碳释氧效益研究[J]. 中国园林, 2010, 26(12): 1-6.
- [21] 吴婕, 李楠, 陈智, 等. 深圳特区城市植被的固碳释氧效应[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2010, 49(04): 86-92.
- [22] 王修信, 高凤飞, 刘馨, 等. 北京城市绿地三种常见林木冠层光合作用特征[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(20): 104-109.
- [23] LIU Y L, ZHOU G M, DU H Q, et al. Response of Carbon Uptake to Abiotic and Biotic Drivers in an Intensively Managed Lei Bamboo Forest[J]. Journal of Environmental Management, 2018(223): 713-722.
- [24] 于贵端, 方华军, 伏玉玲, 等. 区域尺度陆地生态系统碳收支及其循环过程研究进展[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5449-5459.
- [25] 陈文婧. 城市绿地生态系统碳水通量研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [26] 李霞, 孙睿, 李远, 等. 北京海淀公园绿地二氧化碳通量[J]. 生态学报, 2010, 30(24): 6715-6725.
- [27] 孙春健, 王春林, 申双和, 等. 珠三角城市绿地CO₂通量的季节特征[J]. 生态学报, 2012, 32(04): 269-278.
- [28] CHEN L, LIU Y L, ZHOU G M, et al. Diurnal and Seasonal Variations in Carbon Fluxes in Bamboo Forests during the Growing Season in Zhejiang Province, China[J]. Journal of Forestry Research, 2019, 30(02): 657-668.
- [29] KELL W, ALLEN G, EVA F, et al. Energy Balance Closure at FLUXNET Sites[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 113(1): 223-243.
- [30] RICE A H, PYLE E H, SALESKA S R, et al. Supplement: The Large-scale Biosphere-Atmosphere Experiment in the Amazon Carbon Balance and Vegetation Dynamics in an Old-Growth Amazonian Forest[J]. Ecological Applications, 2004, 14(4): 55-71.
- [31] 刘毅, 王婧, 车轲, 等. 温室气体的卫星遥感——进展与趋势[J]. 遥感学报, 2021, 25(01): 53-64.
- [32] 徐新良, 曹明奎. 森林生物量遥感估算与应用分析[J]. 地球信息科学, 2006(04): 122-128.
- [33] 王紫君, 申广荣, 朱贲, 等. 上海城市森林叶生物量遥感监测[J]. 生态学杂志, 2016, 35(05): 1308-1315.
- [34] 汤煜, 石铁矛, 卜英杰, 等. 城市绿地碳储量估算及空间分布特征[J]. 生态学杂志, 2020, 39(04): 1387-1398.
- [35] YAO Z Y, LIU J J, ZHAO X W, et al. Spatial Dynamics of Aboveground Carbon Stock in Urban Green Space: A Case Study of Xi'an, China[J]. Journal of Arid Land, 2015, 7(03): 350-360.
- [36] 徐丽华, 张结存, 黄博, 等. 基于QuickBird影像的城市森林碳储量遥感估测[J]. 应用生态学报, 2014, 25(10): 2787-2793.
- [37] 刘茜, 杨乐, 柳钦火, 等. 森林地上生物量遥感反演方法综述[J]. 遥感学报, 2015, 19(01): 62-74.
- [38] 谭一凡, 郝广平, 王敏姿, 等. 深圳市建成区森林碳分布估测方法比较研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(11): 140-144.
- [39] 陆超, 沈建军, 王秀云, 等. 温州城区绿地生物量时空动态变化研究[J]. 浙江林业科技, 2017, 37(04): 18-23.
- [40] 邱布布, 徐丽华, 张茂震, 等. 基于Landsat OLI和ETM+的杭州城市绿地上生物量估算比较研究[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(01): 225-232.
- [41] 董利虎, 李凤日, 贾玮玮. 基于线性混合效应的红松人工林枝条生物量模型[J]. 应用生态学报, 2013, 24(12): 3391-3398.
- [42] 刘博. 基于高分辨率影像的杭州西湖区绿地生物量研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2015.
- [43] HE S B, DU H Q, ZHOU G M, et al. Intelligent Mapping of Urban Forests from High-Resolution Remotely Sensed Imagery Using Object-Based U-Net-DenseNet-Coupled Network[J]. Remote Sensing, 2020, 12(23): 3928.
- [44] 邢璐琪, 张桂莲, 张浪, 等. 高光谱技术在植被特征监测中的应用[J]. 园林, 2020(11): 8-14.
- [45] 刘丽娟, 庞勇, 范文义, 等. 机载LiDAR和高光谱融合实现温带天然林树种识别[J]. 遥感学报, 2013, 17(03): 679-695.
- [46] SUN Y, XIE S, ZHAO S. Valuing Urban Green Spaces in Mitigating Climate Change: A City-Wide Estimate of Aboveground Carbon Stored in Urban Green Spaces of China's Capital[J]. Global Change Biology, 2019, 25(5): 1717-1732.
- [47] CHEN S Y, JIANG L X, JIANG Z Y, et al. Aboveground Biomass of Greening Tree Species and Carbon Storage for Different Types of Green Space in Chengyang Street[J]. Geographical Science Research, 2018, 7(2): 141-147.
- [48] 申鑫, 曹林, 余光辉. 高光谱与高空间分辨率遥感数据的亚热带森林生物量反演[J]. 遥感学报, 2016, 20(06): 1446-1460.
- [49] 温宥越, 孙强, 燕玉超, 等. 粤港澳大湾区陆地生态系统演变对固碳释氧服务的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(23): 8482-8493.
- [50] LI X L, DU H Q, ZHOU G M, et al. Spatiotemporal Dynamics in Assimilated-LAI Phenology and its Impact on Subtropical Bamboo Forest Productivity[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2021(10): 96.
- [51] 邢璐琪. 基于多源遥感数据的竹林LAI多尺度同化及在碳循环模拟中的应用[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2019.
- [52] 刘腾艳, 毛方杰, 李雪建, 等. 浙江省竹林地上碳储量的时空动态模拟及影响因素[J]. 应用生态学报, 2019, 30(05): 1743-1753.