

城市绿地碳核算方法及增汇减排技术研究进展

Research Progress of Urban Green Space Carbon Accounting and Sink Increment and Emission Reduction Technology

武艳芳¹ 易 扬² 张桂莲^{2*} 张 浪^{2*} 胡传伟¹ 林奕成² 徐自恒¹
WU Yanfang¹ YI Yang² ZHANG Guilian^{2*} ZHANG Lang^{2*} HU Chuanwei¹ LIN Yicheng² XU Ziheng¹

(1. 棕榈生态城镇发展股份有限公司, 郑州 450003; 2. 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, 上海市城市困难立地园林绿化技术工程中心, 上海 200232)

(1. Palm Ecological Town Development Co., Ltd., Zhengzhou, Henan, China, 450003; 2. 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 Sties, Shanghai Engineering Research Center of Landscape on Challenging Urban Sties, Shanghai, China, 200232)

文章编号: 1000-0283(2024)07-0074-07
DOI: 10. 12193/j. laing. 2024. 07. 0074. 009
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2024-03-12
修回日期: 2024-05-28

摘 要

城市绿地是城市中直接碳汇和间接减排的重要生态空间, 但其建设和运维过程也会产生碳排放, 核算和评估城市绿地全生命周期的碳固定和碳排放, 因地制宜采增汇减排措施, 是实现城市绿地碳汇能力巩固提升的重要基础。梳理城市绿地碳源/汇核算方法, 碳排放核算法主要包括基于温室气体清单核算的足迹法、属性法、填报法等, 基于国际标准与指南的计算法以及基于研究的数学模型、现场观测和实验室测定等, 其中温室气体清单核算法运用最为广泛; 碳汇核算方法主要包括实地测量法、同化量法、微气象法、遥感估测法和信息技术测量法等。绿地增汇方法主要包括优选本地化苗木、选择低碳景观材料、适度改造地形、运用现代信息技术进行高效管控等。总结核算方法与增汇减排技术, 以期对相关研究的开展、方法与技术的应用提供科学基础; 为城市绿地碳汇能力提升、城市碳中和目标的实现提供科学支撑。

关键词

城市绿地; 碳源; 碳汇; 核算方法; 增汇减排

Abstract

Urban green space is an important ecological space for direct carbon sequestration and indirect emission reduction in cities, but its construction and operation and maintenance process will also produce carbon emissions. Accounting and evaluating the carbon sequestration and emission of urban green space throughout its life cycle, and adopting sink increase and emission reduction measures according to local conditions are an important basis for consolidating and improving the carbon sequestration capacity of urban green space. This paper reviews the carbon source/sink accounting methods of urban green space. The carbon emission accounting methods mainly include footprint method, attribute method, filling method, etc., calculation method based on international standards and guidelines, mathematical model based on research, field observation and laboratory measurement, etc., among which the greenhouse gas inventory accounting method is the most widely used. Carbon sink accounting methods mainly include field measurement method, assimilation method, micrometeorology method, remote sensing estimation method and information technology measurement method. The methods of afforestation increase mainly include optimizing local seedlings, selecting low-carbon landscape materials, moderately transforming terrain, and using modern information technology for efficient management and control. To summarize the accounting methods and the technology of increasing sinks and reducing emissions, in order to provide a scientific basis for the development of related research and the application of methods and technologies; To provide scientific support for the improvement of urban green space carbon sink capacity and the realization of urban carbon neutrality.

Keywords

urban green space; carbon source; carbon sink; accounting method; sink increment and emission reduction

武艳芳

1983年生/女/河南洛阳人/硕士/高级工程师/研究方向为园林植物与应用、生态碳汇

张桂莲

1976年生/女/山西太原人/博士/高级工程师/研究方向为生态学

张 浪

1964年生/男/博士/教授级高工(二级)/博士生导师/上海领军人才/享受国务院特殊津贴专家/上海市园林科学规划研究院院长, 兼任城市困难立地园林绿化国家创新联盟理事长、上海城市困难立地绿化工程技术研究中心主任、城市困难立地生态园林国家林草局重点实验室主任/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: zgl@shsyky.com; zl@shsyky.com

1 城市绿地应对气候变化的挑战

1.1 中国应对气候变化政策

气候变化是当今人类生存和社会经济发展面临的严峻挑战，是世界各国普遍关注的重大全球性问题。中国高度重视应对气候变化工作，一直积极参与和推动国际团结合作，是全球生态文明建设的重要参与者、贡献者和引领者。2020年9月22日，习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论郑重宣示，中国二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。2021年10月，中共中央、国务院下发《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》（中发〔2021〕36号）提出，建设城市生态和通风廊道，提升城市园林绿化水平。由此可见，科学推进城市园林绿化建设，提升城市生态系统碳汇能力，已经成为当前中国做好城市“双碳”工作所面临的当务之急。

随着全球气候变暖趋势的加剧，城市正面临高温、洪涝和干旱等多重气候挑战。城市绿地通过吸收太阳能、降低热岛效应以及调节降雨量等方式，可以有效地缓解这些气候问题。此外，绿地还能增强蒸腾作用，提升空气湿度，从而提升城市的舒适度；减缓暴雨径流速度，增加土地蓄水能力，有效应对城市洪涝灾害。因此，城市绿地在应对气候变化方面发挥着不可替代的作用。在国土绿化增量有限的情况下，发展以增汇、减排、稳库为导向的碳汇型城市绿地，建设高质量城市绿地生态系统，提升单位面积碳汇能力，将成为新发展阶段上海贯彻落实中央应对气候变化有关精神、积极有效提升生态系统碳汇水平和生态效益的重要举措，为促进城市高质量发展、实现人民高品质生活提供重要保障。

1.2 城市绿地的直接固碳和间接减碳作用

城市绿地是指在城市环境中呈现娱乐和自然景观特征的各种开放绿地，包括公园绿地、防护绿地、广场绿地、附属绿地和区域绿地。城市绿地是城市地区近自然生态空间，在实现碳中和方面发挥着至关重要的作用，其不仅能够直接吸收大气中的碳，还能够调节微气候，保护水资源，吸收污染物等，从而间接减少城市碳排放^[1]。城市绿地提供了多种有益于人类健康和福祉的生态系统服务，还具有碳封存能力，能发挥抵消二氧化碳排放的生态系统调节服务^[2-3]。随着对城市绿地提供碳储存和调控服务的深入研究，理解全球碳循环和指导城市可持续发展显得越来越重要。

城市绿地是生态空间体系的关键性要素，更是城市生态系统碳汇能力建设的重要依托^[3]。在资源集约、人口密集、用地紧缺的城市化区域，规划和建设高质量的城市绿地，既可以发挥其多重效益，也可提升城市生态系统碳汇能力^[4-5]。研究表明，绿地在建设过程中处于碳源，建设期间不同的用材、能源消耗和施工工艺等，对碳排放有直接的影响作用^[6-7]。在绿地养护管理阶段，浇水、施肥、病虫害防治、植物修剪等也会带来碳排放^[8]。为进一步增加城市绿地的碳中和能力，国内外学者开展了城市绿地碳核算及增汇减排技术的研究，如公园绿地生态群落的固碳速率及总碳封存量的监测与评估^[9-10]，曲线设计的植物景观比线性设计吸收更多的碳^[11]，城市一郊区梯度变化会影响植物碳吸收等^[12]。

2 城市绿地碳源/汇核算方法

2.1 城市绿地全周期碳核算

建设项目全生命周期的概念起源于英国人Gordon提出的“全生命周期成本管理”理

论，指建设项目从材料的生产运输、规划和设计、施工和建造、运行和维护直到拆除和处理全过程。生命周期能耗分析是实现生命周期评价的一种简单可行的方法。国内外相关研究表明，绿地在建设过程中处于碳源的状态，建设期间的用材、能源消耗和施工工艺等方式，对绿地建设期间的碳排放有直接的影响作用。从绿地增汇角度，许多研究从空间布局、高碳汇绿化树种筛选与植物群落配置、土壤碳固持能力的提升等方面开展工作。城市绿地从规划设计、建设到管养全生命周期碳收支核算的研究还比较少见。实际上，在城市绿地整个全生命周期中，植物、水域和土壤具有重要的固碳和碳储存能力，工程建设和养护管理等人为活动也会产生能源消耗和碳排放，目前没有明确统一的方法来量化每个环节的碳源/汇状况。如何在绿地项目建设和管理过程中协调减排和增汇的关系，从而提升城市绿地的碳汇能力，仍缺乏统一的核算方法。

2.2 城市绿地碳汇核算方法

2.2.1 实地监测法

通过选取样地开展绿地植被和土壤的调查和监测，获取相关数据进行碳储量或碳汇量的计算，主要包括异速生长方程法和生物量扩展因子法。

异速生长方程法是使用测量的树胸径和树高（或单一胸径）作为自变量，生物量作为因变量构建的回归模型^[13]。许多研究使用前人已建立的异速生长方程来计算城市绿地中树木的碳储量。但这种方法也存在局限性，例如，城市尺度获取每棵树的胸径和树高存在很大难度，既昂贵又耗时^[14]。也有学者认为，基于自然环境建立的异速生长方程可能会高估城市树木的生物量，有必要建立

独特的异速生长方程更准确地计量城市树木的生物量和碳储量^[15]。

生物量扩展因子法通过选择代表性的样地进行详细的生物量调查，获得样地的平均生物量作为扩展因子，进而估算区域或更大尺度的生态系统生物量，其常用于大空间尺度和长时间序列的森林、草原、湿地等生态系统的生物量动态分析^[16]。如Kathiresan等^[17]基于森林清查数据，结合生物量模型计算出红树林的固碳速率。但扩展因子不是一个固定的常数，其与树龄等因素密切相关。与异速生长方程相比，BCF方法在计算碳汇时未得到广泛应用。而且，在使用这种方法时，确定不同地区和树种的转换参数非常重要。需要注意的是，异速生长方程法和生物量扩展因子法计算的都是碳储量，而碳汇量的计算需要用两个不同时间段的碳储量进行差值运输。

2.2.2 模型计算法

根据城市绿地植物信息，模拟树木的生长状态，进而计算绿地碳储量或碳汇量。这类方法被广泛用于评估城市绿地的碳储量、碳汇量及其他生态系统服务^[18]，主要有CASA模型、CITYgreen模型、i-Tree模型、环境服务与权衡综合评估（Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs, InVEST）模型、城市碳氧平衡模型等。模型计算能够节约大量时间、精力和材料资源，能更加准确地估算碳储量和碳汇量。

CASA模型结合遥感数据和生态过程来模拟和预测生态系统的碳循环，需要进行数据的收集和处理，包括气象、土壤和遥感数据等，专门用于估算陆地生态系统的净初级生产力（NPP），评估其碳汇功能，在许多城市绿地碳储量或碳汇量计算中有广泛应用^[19]。

CITYgreen模型主要用于评估城市森林的

生态效益，可以通过模拟城市绿地的生物量来估算其碳储量，例如有学者使用CITYgreen模型和生物量转换方法对鹤山人工林样地的碳储量进行了计算^[20]。李亚亮等^[21]对上海4个不同时期的代表性公园（鲁迅公园、长风公园、曲阳公园、徐家汇公园）的生态效益进行了评估，结果表明这些公园在固碳和削减暴雨径流方面发挥了显著的生态功能。

i-Tree模型旨在评估城市树木和森林的生态、经济和社会价值，通过估算城市树木和森林吸收的二氧化碳量及其释放的氧气量，来评估其对空气质量改善的贡献；通过分析大树遮阴减少建筑物能源消耗、大树蒸发作用降低周围环境温度等能力获取城市树木的间接减排作用。但该模型采用的方法，是以美国城市优势种的生物量为参考，使用时需要根据研究地和研究树种进行修改^[22-23]。

InVEST模型是带有碳储存模块的生态系统服务评估模型，该模块能估算特定区域的碳储存量，适用于多种空间尺度。于舒逸等^[24]采用InVEST模型评估浙江省台州市路桥区碳储量和碳密度，反映了路桥区固碳能力的空间特征。郭茹等^[25]采用InVEST模型分析了2000–2020年上海市生态空间总体碳汇量的特征。

城市碳氧平衡模型用于研究城市绿地的碳氧平衡，通过量化城市自然生态系统如湿地、淡水、海洋、森林和农田的固碳释氧能力，评估这些生态系统对城市环境的贡献。Yin等^[26]使用该模型在中国厦门进行了实证研究，发现现阶段城市植被无法满足城市碳中和的固碳需求，至少需要9.6倍数量的植被才能实现目标。

2.2.3 同化量法

同化量法测量植物叶片内外的瞬时二氧化碳浓度和水分，通过将叶面积乘以单位时

间的净光合速率来获得固碳量^[27]。有学者使用该方法评估不同植物的固碳能力，并在小尺度上筛选碳汇较大的物种。Gratani等^[28]使用这种方法计算了罗马4个城市公园的植被碳封存能力，结果表明，其总量相当于2010年罗马温室气体排放量的3.6%。但同化量法的准确性会受到如光强和温度等气象因素的影响。

2.2.4 微气象法

微气象学方法通过测量绿地与大气之间的二氧化碳通量，来计算城市生态系统的动态碳循环。涡度相关法（Eddy Covariance, EC）是一种具有代表性的微气象学方法，已被广泛应用于研究森林、农田、草地和湿地等自然环境中的碳循环研究^[29]。虽然大量研究表明，EC方法在准确估算二氧化碳通量方面是有效的，但是城市地区的二氧化碳通量测量受到季节因素以及风速和风向的影响。此外，在建筑物和植被高度集中的城市地区，需要通过通量塔来使用EC方法测量二氧化碳通量，这限制了可以测量二氧化碳通量的区域。此外，通量数据通常是局部的，不能应用于其他站点。

2.2.5 遥感估测法

遥感（Remote Sensing, RS）技术具有快速、实时和大规模数据采集等优势^[30]。将遥感和现场调查数据相结合，有助于快速测量碳封存效率。激光雷达（LightLaser Detection and Ranging, LiDAR）是一种主动遥感技术，广泛应用于估算城市树木的属性以及树木生长建模、生态系统服务制图、环境评估和监测^[31]。利用激光雷达点云数据自动检测单棵树算法是实现遥感技术的一种常用方法。基于树木的3D结构，激光雷达可以实现地上生物量测量、简单的物种组成分析、间隙分

析和碳含量测量^[32]。激光雷达数据提供的植被精细尺度的3D结构有助于绘制高度异质城市景观中地上碳储量的空间分布图^[33]。结合高光谱图像,激光雷达数据为复杂城市地区提供了详细的植被信息。此外,激光雷达还可以精确测量城市树木的生物量及其碳储量,并可以降低现场测量的频率和监测成本^[31]。然而,在植被密度较大的绿地中有效提取树冠下的数据存在难度,激光雷达的测量精度受到限制。

2.2.6 信息技术测量法

现代信息技术如物联网、大数据和人工智能的发展促进了城市公共绿地碳汇评估技术的进步,形成了一个高效、精准的碳汇分析体系。Pham等^[34]使用机器学习技术收集红树林的地上生物量数据,这对计算城市绿地碳储量是十分重要的,加速了该领域的快速发展。Sasaki开发的Carbon Conscience App的运行方式与其他碳计算器类似,其不同之处在于能够估算每种土地利用类型的固碳影响力^[35]。随着遥感科学技术的进步,谷歌地球引擎云计算平台的出现为估算城市公共绿色空间的碳存储和碳封存提供了一种新的选择。

2.3 城市绿地碳排放核算方法

当前碳排放国际研究的一些主要核算方法包括:(1)温室气体清单核算法。发达国家已经建立了全国性的温室气体排放监测网络,包括基于大气成分的足迹法、属性法、填报法等,为城市绿地碳排放研究提供了可靠的数据基础。(2)国际标准与指南核算法。国际标准组织和政府组织为碳排放研究和碳交易提供了相关的标准与指南,这些标准和指南规范了碳排放量计算和汇报流程,

促进了碳减排和碳市场的发展。(3)其他研究核算法。采用数学模型、实验室测定、现场观测等多种方法,分析碳排放的来源分布、规律特征和影响因素,从而为碳减排和碳管理提供科学依据。其中温室气体清单核算法运用最为广泛。

国家重视温室气体排放,积极推行温室气体减排政策。为加强省级清单编制的科学性、规范性和可操作性,发布了《省级温室气体清单编制指南》(试行)。城市作为碳排放的重要区域,也按照该指南开展能源、工业、农业、土地利用变化和林业及废弃物等领域的碳排放。但城市绿地作为重要的生态资源,存在两种情况的碳排放核算,一种是城市绿地中部分被作为林业数据统计,作为负排放领域编入清单;另一种情况从全生命周期进行碳核算。前者多为国家统计局数据需要,后者多从工程的角度开展研究。

从城市绿地全生命周期核算其碳排放量,主要来源于景观材料生产、景观建造、景观日常使用、景观维护管理等阶段。每个阶段都有相应的材料使用和能源消耗,如景观材料混凝土砖、钢板、陶砖、石材、大理石等的生产,景观材料、景观植物的运输,景观照明设备的使用,机械修剪、灌溉用水、杀虫剂等景观维护等产生的碳排放。王晶懋等^[36]将全生命周期划分为规划设计、建设实施、管理运营三个层面,从全生命周期出发对西安建筑科技大学小尺度绿地样点在各个阶段的碳排放进行计算,并对各阶段的碳排放进行量化比较。何晶^[37]对广州城市绿地海珠湖公园的乔木群落进行全生命周期碳核算,其中碳排放考虑了施工建造、管理养护两个阶段,得出平均施工建造碳排放量为4 621 kgC/hm²,管理养护碳排放量为11 239 kgC/hm²。

3 城市绿地碳收支评估

在进行城市绿地全生命周期碳核算之前,首先要确定核算的范围,包括绿地的类型、面积、地理位置等。然后进行实地调研和资料收集,收集的数据包括绿地的基础信息(如种类、分布、面积)、生长情况(如生长速度、生长量)、养护情况(如灌溉、施肥等)以及与碳排放和碳吸收相关的数据(如能源消耗、二氧化碳排放等)。收集到的数据需要进行整理,确保其准确性和完整性。根据收集的数据,利用相关模型和方法计算绿地的碳汇量。碳汇量是指绿地通过光合作用吸收并储存二氧化碳的能力。通过对绿地类型的不同、生长周期的长短等因素进行综合评估,得出绿地整体的碳汇能力。除了计算碳汇量,还需要核算绿地在全生命周期内的碳排放量。这包括绿地建设过程中的碳排放(如建材生产、运输等)、养护过程中的碳排放(如灌溉、施肥等)以及绿地废弃后的碳排放(如废弃物处理等)。

分析不同绿地类型、不同管理策略对碳汇和碳排放的影响,对碳汇量计算、碳排放量核算以及碳汇增量预测的结果进行分析和讨论,与其他城市的绿地碳核算结果进行比较和分析,找出存在的问题和改进的空间,为城市绿地的优化管理提供参考。将碳核算的结果和分析以报告的形式进行编写和发布。报告应详细记录核算的过程、方法、结果以及讨论内容,并提供针对性的政策建议和改进措施。报告应以易于理解的方式呈现,方便相关决策者和公众了解城市绿地的碳汇和碳排放情况。基于碳核算的结果和分析,提出具体的政策建议和推广措施。建议包括优化绿地布局、推广节能技术、加强绿地养护等。通过推广这些措施,可以提高城市绿地的碳汇能力,降低碳排放量,为城市的可持

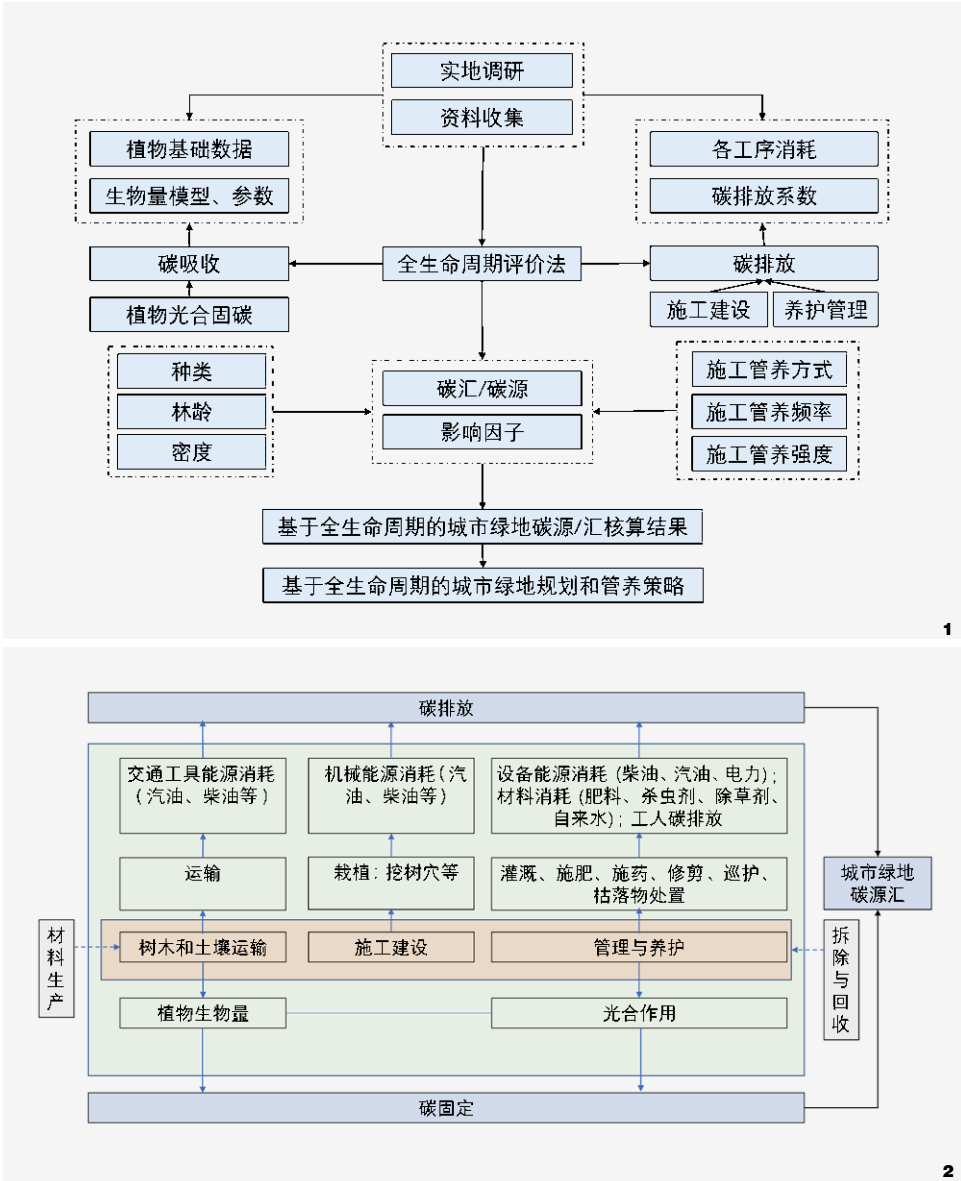


图1 城市绿地全生命周期碳核算流程

Fig. 1 Carbon accounting process of urban green space throughout its life cycle

图2 城市绿地园林绿化生产、运输、养护和管理碳核算流程

Fig. 2 Carbon accounting process of urban green space conservation and management

续发展作出贡献。同时，也可以将这一碳核算流程和方法推广到其他城市或地区，为更广泛的绿地碳核算提供参考和借鉴（图1）。

城市绿地园林绿化养护管理碳核算流程具体包含数据收集与整理、碳排放源识别、碳排放量计算、碳吸收量计算、碳足迹

分析、碳减排措施。数据收集与整理包含收集城市绿地园林的相关数据，包括但不限于绿地类型、面积、植被种类、养护管理措施等。整理历年来的绿地园林养护记录，包括浇水、施肥、修剪、病虫害防治等活动的频次和效果。整理与碳核算相关的背景资料，

如当地的气候条件、植被生长情况等。碳排放源识别包含分析绿地园林养护管理过程中的碳排放来源，如燃油消耗、化肥农药使用、废弃物处理等（图2）。

碳排放量的计算包含根据识别的碳排放源，收集相应的碳排放系数。结合养护管理过程中的数据，使用碳排放系数计算各碳排放源的排放量。汇总各排放源的排放量，得到总碳排放量。碳吸收量计算包含根据绿地园林中的植被种类和面积，收集各类植被的碳吸收率。结合植被生长情况，使用碳吸收率计算各类植被的碳吸收量。汇总各类植被的碳吸收量，得到总碳吸收量。碳足迹分析包含对比碳排放量和碳吸收量，分析绿地园林养护管理的碳足迹。识别碳足迹的主要影响因素，为后续碳减排措施的制定提供依据。碳减排措施包括根据碳足迹分析结果，制定针对性的碳减排措施。优化养护管理措施，减少不必要的燃油消耗、化肥农药使用等。推广低碳环保的养护技术和方法，如生物防治、有机肥料使用等。

4 城市绿地增汇和减排技术

4.1 城市绿地碳增汇

4.1.1 植物物种及群落的选择

有研究表明，速生树木比生长缓慢的树木在固碳方面表现更好，在绿地营建时可根据实际情况，视绿地综合生态效益进行树木的选择^[39]。而树木种植密度与年平均固碳量的关系存在争议，有研究称它们之间呈正相关^[40]，也有研究表明不呈现同比例增长，与相似的树木覆盖率和种植密度较高的封闭绿地比较，部分开放的绿地具有更高的固碳率^[41]。王晶懋等^[36]通过核算小尺度绿地碳足迹，筛选出6种乡土高固碳地被植物群落模式。在选种过程中，应优先就近选购健康

的本地化苗木，避免运输产生碳排放，还应合理选用适宜规格的苗木，如幼龄、中龄苗木，尽量避免为了快速成景而大规模运用大规格苗木。在挖运、栽种过程中做好苗木保护措施并做适量修剪，并按园林植物种类做好相应的养护管理，保证苗木成活并茁壮生长，以降低补苗返工造成的额外碳排放。以近自然的手法建设多结构、多层次、多功能的复层植物群落，促进空间生境多样化、结构多元化，以此提高园林系统的生物多样性与稳定性。因此，在设计施工过程中应兼顾植物观赏性和适用性，科学配置植物类型，优化乔木、灌木和草本植物群落结构，合理种植速生树种，可以充分发挥园林植物群落的物种协作固碳能力。

4.1.2 土壤碳固持能力提升

城市绿地土壤也是重要的碳库，在建设过程中土层深度、绿地类型、土壤理化性质等是土壤碳汇的主要影响因素。如不同生长速度的植物其凋落物产生不同，对土壤细菌或真菌食物网的形成产生不同的影响^[42]。植物组成与结构影响根际土壤碳积累速度，进而改变土壤特征^[43]。利用园林废弃物制备土壤有机肥，栽培介质等作为土壤改良剂，提升土壤肥力，促进植物健康生长^[44]。因此，根据土壤特征，合理设计种植植物，改善土壤结构和理化性质，可增强土壤固碳能力，提升绿地碳汇。

4.1.3 生态空间优化配置

中国城市化发展迅速，生态建设用地紧张，绿化增量空间有限、零散、立地条件差等问题越来越突出。《上海生态空间建设和市容环境优化“十四五”规划》指出，将优化生态空间结构，重点建设千园工程、环城

生态公园带等绿化项目，不断提升城市生态系统碳汇能力。韩美玥^[45]对西安居住区绿地的碳汇能力进行了研究，提出不同类型小区绿地的增汇策略，如新建小区推荐选用“面状绿地+带状绿地”的配置模式，倡导屋顶绿化；老旧小区建议利用攀援类植物绿化不同的立体空间，增加垂直绿化面积；高密度小区建设时通过建筑物之间交错排布扩大绿地面积；低密度着重提升绿地质量等。可见，合理布局城市绿化空间，构建功能复合的城市绿地生态网络，可有效发挥城市绿地植物和土壤的固碳作用，提升绿地碳汇能力。

4.1.4 运用低碳管理理念

低碳理念正在成为引领市政园林设计与建设的主导思想，采用碳汇监测技术、智慧智能技术、数字孪生技术、5G技术以及互联网技术，并巧妙地融合在绿地规划、建设、管理等全生命周期融入“碳中和”理念，打造一套先进的城市绿地智慧营养模式，是实现低碳管理的重要方法。低碳管理离不开固碳、增汇多种手段的支撑，需要通过产业低碳化发展、能源绿色化转型、设施集聚化共享、资源循环化利用、碳要素智慧化管理，在绿地内固碳增汇，实现生产、生态、生活深度融合。

4.2 城市绿地碳减排

城市绿地建设包括园林建设和绿化种植，存在建设碳排放和植物固碳两种特征。在园林城市建设的大背景下，城市绿地建设步伐加快，为了增加物种丰富度和多样性，引入外来园林植物，导致生态系统抵抗入侵生物和病虫害能力降低，增加了养护材料和能源的消耗。而且园林建设追求快速成景，大批量使用大规格苗木，很容易造成树木成

活率下降，再次大量补植，增加了挖穴、运输和栽种过程的能耗等。绿地养护过程产生大量的枯枝落叶等园林废弃物，如果不进行循环利用，也会带来碳排放。

学者对城市森林和行道树的碳储量进行评估，发现过度养护会产生更多的碳排放^[38]，这对城市绿地的养护有借鉴作用。景观设计过程不产生碳排放，但要遵循低碳设计原则，以低碳低维护为核心，科学指导绿地营建。随着低碳园林建设理念逐步被融入城市发展，许多减排措施和路径被提倡^[36]。(1) 优选本地化苗木，提高存活率，达到适地适树，降低补苗返工造成的额外碳排放。(2) 选择低碳景观材料，如选择碳排放系数低的混凝土，并就近采购，避免远距离运输产生的碳排放。(3) 适度改造地形，避免大量土方的挖掘、运输和填埋。(4) 适度改良土壤，优先采用绿化废弃物进行资源化利用，避免改良材料带来的生产、运输和改良过程产生的碳排放。(5) 运用现代信息技术，实时监控植物生长及环境状况，基于精确用水、用电、用药需求开展科学养护，减少传统方法产生的碳排放。

5 结论

城市绿地是城市地区近自然生态空间，不仅能够直接吸收大气中的碳，还能够调节微气候，保护水资源，吸收污染物，从而间接减少城市碳排放，在实现碳中和方面发挥着至关重要的作用。城市绿地具有高度异质性，其碳储量与碳汇量核算比森林更为复杂，现有研究多数依靠间接估算，且估算结果容易产生不确定性。另外，城市绿地在城市碳减排中的作用仅停留在理论层面，多数体现在专项规划中。本文总结了城市绿地碳源/汇核算方法及增汇减排技术，以期为规

划、设计和建设面向碳中和的城市绿地建设提供理论和技术支撑。

注：文中图片均由作者绘制。

参考文献

- [1] YI Y, ZHANG C, ZHANG G L, et al. Effects of Urbanization on Landscape Patterns in the Middle Reaches of the Yangtze River Region[J]. Land, 2021, 10(10): 1025.
- [2] 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.
- [3] 史舒琳. 中国风景园林行业应对气候变化和支持双碳目标的现状、需求与策略[J]. 中国园林, 2023, 39(03): 34-39.
- [4] 李静, 张浪, 李敬. 城市生态廊道及其分类[J]. 中国城市林业, 2006(05): 46-47.
- [5] 徐丽华, 陈婷, 张瑞华. 低碳园林研究综述及研究热点分析[J]. 园林, 2022, 39(01): 10-17.
- [6] 王蒙蒙. 低碳理念下的城市风景园林建设问题与对策[J]. 现代园艺, 2022, 45(04): 107-109.
- [7] 李爱霞. 基于“双碳”背景下的园林景观设计[J]. 现代园艺, 2022, 45(06): 106-108.
- [8] 寇玉荣. 低碳理念下的北京城市绿地养护管理技术初探[J]. 绿化与生活, 2017(01): 21-24.
- [9] SHADMAN S, AHANAF K P, 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.
- [10] 张岚, 宋钰红, 张慧琳, 等. 城市森林碳汇及估算方法比较[J]. 现代园艺, 2023, 46(11): 73-78.
- [11] 张浪. 风景园林碳汇能力建设的基本逻辑[J]. 园林, 2023, 40(01): 2-3.
- [12] 孙洋洋, 沈泽琦, 黄乐妍, 等. 不同城市绿地类型碳源/汇的城乡梯度格局——以杭州为例[J]. 生态学报, 2024, 44(03): 930-943.
- [13] 林静, 刘宇, 苏常红. 基于多异速生长方程的半干旱区樟子松人工林碳储量评估及预测 [J/OL]. 生态学杂志, 1-11[2024-06-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20231121.1418.002.html>
- [14] 路文燕, 董灵波, 田园, 等. 基于树种组成的大兴安岭天然林主要树种树高—胸径曲线研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2023, 47(04): 157-165.
- [15] ALTANZAGAS B, LUO Y K, ALTANSUKH B, et al. Allometric Equations for Estimating the Above-Ground Biomass of Five Forest Tree Species in Khangai, Mongolia[J]. Forests, 2019, 10(8): 661.
- [16] 罗云建, 张小全, 侯振宏, 等. 我国落叶松林生物量碳计量参数的初步研究[J]. 植物生态学报, 2007(06): 1111-1118.
- [17] KATHIRESAN K, ANBURAJ R, GOMATHI V, et al. Carbon Sequestration Potential of Rhizophora Mucronata and Avicennia Marina as Influenced by Age, Season, Growth and Sediment Characteristics in Southeast Coast of India[J]. Journal of Coastal Conservation, 2003, 17: 397-408.
- [18] 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.
- [19] 凌思源, 高子滢, 马闯, 等. 基于CASA模型的天津地区植被净初级生产力及植被碳汇量估测[J]. 天津农业科学, 2022, 28(12): 69-75.
- [20] 杜钦, 段文军, 罗盛锋. CITYgreen模型在人工林碳储量核算中的应用研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(11): 103-107.
- [21] 李亚亮, 吴泽民, 樊竞竞. 上海市主要公园空间结构与景观特征分析[J]. 农业科技与信息(现代园林), 2010(02): 4-9.
- [22] 周贝宁, 芦建国, 花壮壮. 基于i-Tree模型的城市绿道生态服务效益研究[J]. 浙江农业学报, 2020, 32(12): 2201-2210.
- [23] 马宁, 何兴元, 石险峰, 等. 基于i-Tree模型的城市森林经济效益评估[J]. 生态学杂志, 2011, 30(04): 810-817.
- [24] 于舒逸, 田涛, 杜甘霖, 等. 基于InVEST模型对县域固碳能力评估研究[J]. 资源与产业, 2023, 25(05): 134-141.
- [25] 郭茹, 邵光辉, 刘林京, 等. 碳中和导向下基于InVEST模型的城市生态空间系统评价研究[J]. 环境科学与管理, 2023, 48(07): 137-141.
- [26] YIN K, ZHAO Q, LI X, et al. A New Carbon and Oxygen Balance Model Based on Ecological Service of Urban Vegetation[J]. Chinese Geographical Science, 2010, 20: 144-151.
- [27] 朱占伟. 某石化公司绿地固碳量计算[J]. 中外能源, 2018, 23(01): 91-96.
- [28] GRATANI L, VARONE L, BONITO A. Carbon Sequestration of Four Urban Parks in Rome[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2016, 19: 184-193.
- [29] 郭文章, 井长青, 邓小进, 等. 新疆天山北坡荒漠草原碳通量特征及其对环境因子的响应[J]. 草业学报, 2022, 31(05): 1-12.
- [30] YI Y, SHI M, WU J, et al. Spatio-Temporal Patterns and Driving Forces of Desertification in Otindag Sandy Land, Inner Mongolia, China, in Recent 30 Years [J]. Remote Sensing, 2023, 15: 279.
- [31] 饶杰生, 杨涛, 田希, 等. 基于背包LiDAR的半湿润常绿阔叶林及其常见树种的垂直结构特征[J]. 生物多样性, 2023, 31(11): 1-11.
- [32] 马佳敏. 机载激光雷达反演森林生物量研究综述 [J/OL]. 林业科技通讯, 2023, 1-9[2024-05-24]. <https://doi.org/10.13456/j.cnki.lykt.2023.08.08.0002>
- [33] 毛沂新, 张慧东. 城市森林碳汇研究进展[J]. 辽宁林业科技, 2023(03): 51-54.
- [34] PHAM T D, LE N N, HA N T, et al. Estimating Mangrove Above-Ground Biomass Using Extreme Gradient Boosting Decision Trees Algorithm with Fused Sentinel-2 and ALOS-2 PALSAR-2 Data in Can Gio Biosphere Reserve[J]. Vietnam, 2020, 12: 777.
- [35] 黄天宝, 欧光龙, 吴勇, 等. 基于机器学习算法的森林生物量多源遥感估测[J]. 西北林学院学报, 2024, 39(01): 10-18.
- [36] 王晶慧, 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.
- [37] 何晶. 基于全生命周期的城市绿地乔木群落碳收支研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
- [38] NOWAK D J, STEVENS J C, SISINNI S M, et al. Effects of Urban Tree Management and Species Selection on Atmospheric Carbon Dioxide[J]. Journal of Arboriculture, 2002, 28: 113-122.
- [39] COSKUN HEPCAN C, HEPCAN S. Assessing Regulating Ecosystem Services Provided by the Ege University Rectorship Garden[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2018, 34: 10-16.
- [40] O'DONOGHUE A, SHACKLETON C M J U F, GREENING U. Current and Potential Carbon Stocks of Trees in Urban Parking Lots in Towns of the Eastern Cape, South Africa[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2013, 12(4): 443-449.
- [41] WANG Y, CHANG Q, LI X J U F, et al. 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.
- [42] ZHANG Q, ZHAO H F, CHENG W Y, et al. Increased Productivity of Temperate Vegetation in the Preceding Year Drives Early Spring Phenology in the Subsequent Year in Northern China[J]. Science of The Total Environment. 903, 2023: 166676.
- [43] 汤煜, 石铁矛, 卜英杰, 等. 城市化进程中沈阳城市绿地土壤有机碳储量空间分布研究[J]. 中国园林, 2019, 35(12): 68-73.
- [44] 刘瑜, 赵佳颖, 周晚来, 等. 城市园林废弃物资源化利用研究进展[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(02): 32-38.
- [45] 韩美玥. 西安市居住区绿地减碳增汇优化策略研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2023.
- [46] YI Y, SHEN G, ZHANG C, et al. Quantitative Analysis and Prediction of Urban Heat Island Intensity on Urban-Rural Gradient: A Case Study of Shanghai[J]. Science of the Total Environment, 2022, 22: 154264.