

刘颂, 张浩鹏. 多尺度城市绿地碳汇实现机理及途径研究进展 [J]. 风景园林, 2022, 29 (12) : 55-59.

多尺度城市绿地碳汇实现机理及途径研究进展

Research Progress of the Mechanism and Approach of Carbon Sink in Urban Green Space at Multiple Scales

刘颂 张浩鹏

LIU Song, ZHANG Haopeng



中图分类号: TU986

文献标识码: A

文章编号: 1673-1530(2022)12-0055-05

DOI: 10.14085/j.fjyl.2022.12.0055.05

收稿日期: 2022-03-29

修回日期: 2022-10-08

刘颂 / 女 / 博士 / 同济大学建筑与城市规划学院教授、博士生导师 / 高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室数字景观模拟分实验室负责人 / 上海城市困难立地绿化工程技术研究中心副主任 / 住建部科技委园林专业委员会委员 / 研究方向为城乡绿地系统规划、景观规划技术方法

LIU Song, Ph.D., is a professor and doctoral supervisor in the College of Architecture and Urban Planning (CAUP), Tongji University, director of the Digital Landscape Simulation Branch of the Key Laboratory of Ecology and Energy-Saving Study of Dense Habitat, deputy director of Shanghai Engineering Research Center of Landscaping on Challenging Urban Site, and a member of the Professional Committee on Landscaping, Science and Technology Commission, Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Her research focuses on urban and rural green space system planning, and technical approach to landscape planning.

张浩鹏 / 男 / 同济大学建筑与城市规划学院在读博士研究生 / 研究方向为风景园林规划设计、生态空间规划

ZHANG Haopeng is a Ph.D. candidate in the College of Architecture and Urban Planning (CAUP), Tongji University. His research focuses on landscape planning and design, and ecological space planning.

摘要: 建设与保护城市绿地作为基于自然的解决方案 (NbS) 的重要策略之一, 对减缓气候变化、实现“碳达峰”及“碳中和”具有积极的作用。从多尺度视角全面认识城市绿地碳汇功能, 分析其实现途径及其机理, 有利于实现城市绿地全生命周期固碳能力提升, 助力城市“双碳”目标实现。从城市绿地斑块、城区绿地系统、市域生态空间 3 个尺度切入, 剖析碳汇功能的实现途径及机理, 总结各尺度促进绿地碳汇效应提升的关键途径。建议未来应开展城市绿地全生命周期碳汇功能评估框架研究; 进行城市绿地碳汇与其他功能间权衡协同关系研究; 探究城市绿地碳汇功能景观格局驱动机制。

关键词: 风景园林; 碳中和; 城市绿地; 碳汇; 多尺度; 综述

基金项目: 国家自然科学基金 (编号 52178050)

Abstract: As a Nature-based Solution (NbS), the construction and protection of urban green spaces has a positive effect on the mitigation of climate change and the achievement of carbon peaking and carbon neutrality goals. Comprehensively understanding the carbon sink function of urban green space from a multi-scale perspective and analyzing the realization approach and mechanism can help to improve the carbon sequestration capacity of urban green space throughout the life cycle and achieve carbon peaking and carbon neutrality goals. Taking the three scales of urban green space patch, urban green space system, and urban ecological space as the entry points, this research analyzes the approach and mechanism of carbon sink function, and summarizes key approaches to improve the green space carbon sink effect at each scale. In the future, it is necessary to implement research on the evaluation framework of the carbon sink function of urban green space throughout the life cycle, to study the trade-off and synergistic between the carbon sink and other functions of urban green space, and to explore the driving mechanism for the landscape pattern of the carbon sink function of urban green space.

Keywords: landscape architecture; carbon neutrality; urban green space; carbon sink; multi-scale; review

Fund Item: The National Natural Science Fund of China (No. 52178050)

全球气候变化攸关人类的生存和发展, 是 21 世纪人类社会面临的最严峻挑战之一。世界气象组织 2021 年末发布的报告显示, 最近 7 年 (2015—2021 年) 很可能是有记录以来最热的年份^[1]。为应对全球气候变化危机, 国际社会将控制人类活动造成的碳排放及增加碳汇视作减缓危机的主要手段^[2]。中国政府明确提出 2030 年实现“碳达峰”、2060 年实现“碳中和”, 即

“双碳”目标, 并于 2021 年末相继颁布《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》和《2030 年前碳达峰行动方案》。实现“双碳”目标已成为全行业各领域的积极行动方向。

城市绿地对实现城市“双碳”目标至关重要。已有研究多从城市绿地碳汇组分及生态系统类型角度阐述城市绿地碳汇功能实现途径。

如王小涵等^[1]针对城市绿地土壤碳库分析其固碳能力及其影响因素,史琰等^[4]评述了城市植被碳汇能力提升途径,赵彩君等^[5]从减排与增汇角度分析城市绿地系统对低碳城市的贡献。已有研究反映了一个事实,即城市绿地功能尺度效应决定了基于自然的碳汇方案应具有多尺度特点。本研究将风景园林规划设计实践尺度分为城市绿地斑块、城区绿地系统和市域生态空间,并以这3个尺度为切入点,通过文献研究,总结不同尺度城市绿地碳汇功能的实现机理及途径,并从问题出发展望相关研究发展方向,以期提升城市绿地碳汇功能为目标的规划设计和管理等提供科学依据。

1 城市绿地斑块碳汇功能实现途径

1.1 倡导以低碳为目标的绿地建设管理措施

采用低碳为目标的绿地建设管理措施,将从源头间接增加绿地碳汇量。城市绿地建设管理活动通常采用化石燃料驱动的浇灌机械、割草机、卡车等设备,这些设备在使用过程中排放CO₂,间接降低了绿地碳汇能力。Jamirsah等^[6]研究表明,公园绿地的碳固定量仅占其建设管理过程CO₂排放总量的40%,因而其并未发挥碳汇功能,反而成为城市碳源之一。McPherson等^[7]评价了“洛杉矶市百万棵植树计划”执行过程中的碳收支情况,表明灌溉活动导致的CO₂排放量占项目总排放量的9.7%,削弱了项目带来的碳固定效益。因此,减少城市绿地建设与管理过程的CO₂排放量,是增强城市绿地碳汇功能的重要一环。

低碳建设管理措施包括降低人为建设管理活动强度以及使用清洁能源。城市绿地建设宜就地取材,依托自然景观本底塑造绿地景观风貌,避免损毁场地原有树木,减少土地翻新等人为活动对植物和土壤的干扰,防止土地覆被变化带来的碳泄漏^[8],同时因地制宜的建设管理活动(如针对不同草坪生长特点减少修剪次数)将减少大型园林机械及车辆使用频率,从而减少CO₂排放量^[9]。

1.2 提升绿地植物的碳汇能力

城市绿地依托植物光合作用将大气CO₂

直接固定于绿地碳库。但由于植物自养呼吸、微生物异养呼吸、生物群系呼吸作用等生物有机碳消耗过程^[10],加之管理养护活动产生的大量CO₂抵消了植物碳固定量,因而城市绿地直接碳固定量对于降低城市整体CO₂排放量作用有限。Reynolds等^[11]测算了哥伦比亚麦德林市公共绿地中的182 044棵树的碳固定量,表明其碳固定量仅占城市总排放量的0.06%。Liu等^[12]估算沈阳市三环以内地区的城市树木碳固定量为每年2.9万t,仅能抵消沈阳CO₂年排放量的0.26%。尽管城市绿地植被碳固定能力受多种因素共同影响,但通过合理配植方式依然可以提升绿地斑块碳固定效应。

1.2.1 选择碳汇能力高的植物

绿地植物固碳能力主要依赖于植被类型及其叶面积、生长模式和生物量密度。研究表明,拥有更大叶面积、更高生物量、更长寿命的木本植物碳固定效应贡献更大^[13]。非木本植物如草本植物虽然固碳效率高,但其生长周期短(多为一二年生植物),且由于人为修剪、更换频率高,很难有效发挥碳固定效应^[14]。Velasco等^[14]分析表明墨西哥首都墨西哥城草本植物对总植物碳库碳固定贡献可以忽略不计。Millward等^[15]测算多伦多市Allan花园中各树种碳固定量并进行对比,认为固碳效应由高至低依次为苏格兰榆(*Ulmus glabra*)、银枫(*Acer saccharinum*)、黑胡桃(*Juglans nigra*)、挪威枫(*Acer platanoides*)。赵艳玲等^[16]对上海市社区绿地中常见的27种树木进行固碳量测定,发现香樟树固碳量最高,为1 162.8 g·d⁻¹,而梔子最低,仅为11.1 g·d⁻¹。

1.2.2 优化植物群落结构

植物群落物种类型结构特征对木本和草本植物的生长速度、物候特征、凋落物产量和质量、抗病虫害能力等产生不同程度的影响,从而影响城市绿地固碳能力。优化物种组合类型将最大程度促进物种间互利共生效应和削弱物种间的竞争,充分发挥植物群的固碳整体效益。武文婷等^[17]对杭州市绿地植被固碳速率评估发现,针阔混交型和落叶阔叶型群落结构年固碳效率排在7种群落结构类型的前2位,分别达29.754 t·hm⁻²·a⁻¹及27.334 t·hm⁻²·a⁻¹。

群落结构层次越复杂越能更好地利用环境资源,同时能提高土壤的水分、养分有效性,进而提高植物群落固碳能力^[18]。Escobedo等^[19]在美国迈阿密戴德和盖恩斯维尔市进行了碳固定效应研究,认为在植物群落垂直结构中增加灌木和低矮小乔木有助于提升碳固定量。此外,适宜的栽植密度将提高植被水分和养分利用率,增强植被地上、地下生产力,有利于凋落物输入土壤,进而提升植被固碳能力。Mexia等^[20]对葡萄牙阿尔马达市城市绿地植被的碳固定研究表明,植被高密度栽植区域的碳固定量明显高于低密度栽植区域。但栽植密度并非越高越好,如依兰等^[21]通过对单位面积不同栽植密度的样地固碳量对比,证明栽植密度为300~450株·hm⁻²的样地固碳量要高于0~300株·hm⁻²和450~600株·hm⁻²的样地。优化植物群落模式要因地制宜,例如本土物种对当地的气候和环境条件具有较好的适应性,具有长时间碳累积潜力,而外来物种往往具有较高的固碳效率^[22]。

1.2.3 维持树木长时间碳累积能力

植物季节变化的生长特征差异决定了一段时间内树木固碳能力的强弱。潘剑彬等^[23]对北京奥林匹克森林公园进行了连续6年的观测,发现植物不同季节固碳能力由高至低排序为:夏季>秋季>春季>冬季。李霞等^[24]分析了北京海淀公园年CO₂通量,证明了植物生长季(3—10月)是绿地碳固定效应发挥的主要时期。

此外,确保树木长时间碳累积是提升城市绿地碳汇能力的关键。在树木生命初始阶段,树龄不到10年的速生树种比生长缓慢的树种能固定更多的碳。但长期来看,随着速生树木成熟,生长缓慢的树种比生长迅速的树种将累积更多的碳^[25]。Besnard等^[26]研究发现树木年龄是影响其碳固定量的关键因素,树木的碳储量会在其成熟前随树龄升高而增加。但当树木成熟,其碳固定量将逐渐降低,并最终保持在一定范围内。Chen等^[27]对比不同年龄和气候区森林固碳量,发现森林在栽植10~20年后其净固碳量达到峰值,此后其净固碳量逐渐下降。因此,禁止滥砍滥伐树

木,避免碳储量泄漏是发挥绿地植物碳累积能力的前提,同时评估树木生长潜力,确保树木具有较长的生长时间将有利于碳固定量累积^[28]。

1.3 维护绿地土壤碳固定功能

相较于自然土壤,城市绿地土壤发育受人类活动(如绿地建设过程中对土壤翻动、搬运、压实、覆盖及管理使用过程中施肥、灌溉、踩踏等活动)影响显著,导致土壤理化性质及物质循环过程呈现不同特点^[29]。Raciti等^[30]针对纽约市的研究表明,自然状态下,绿地土壤有机碳固定量($5.67 \text{ kgC} \cdot \text{m}^{-2}$)高于经过人为土壤紧实、不透水表面覆被等措施的表层土壤有机碳固定量($2.29 \text{ kgC} \cdot \text{m}^{-2}$)。这是由于土壤紧实增加了土壤容重,不利于土壤呼吸等碳循环过程^[3]。此外,在绿地植被的保护下,土壤免于因太阳直接辐射导致的温度升高与水分蒸发,为土壤生物活动提供了适宜的水热条件,进而加速了凋落物分解、促进了养分输送效率,增加了有机碳积累^[31]。因此,减少人为活动因素对土壤理化性质的负面干扰,保护土壤碳循环过程,增强土壤有机碳积累能力,将有助于城市绿地土壤保持较高的碳固定功能。

2 城区绿地系统绿地碳汇功能实现途径

2.1 合理布局绿地,滞留黑碳气溶胶

随着快速城市化和机动化进程,黑碳气溶胶在大气中的排放量持续增加。黑碳指在工业生产活动、汽车出行、家庭取暖或生物质燃烧过程中,化石燃料不完全燃烧产生的煤烟和焦炭^[32]。黑碳稳定性强,常温下难以被氧化和降解,可以长时间留存于土壤中^[33]。

通过植物布朗扩散、截获、碰撞和沉积滞尘过程^[34],绿地具有沉降并储存黑碳气溶胶的作用。徐福银等^[35]通过研究上海市绿地土壤黑碳含量空间分布特征,发现钢铁厂和造船厂附近绿地黑碳含量远高于居住办公区。刘兆云等^[36]发现杭州城区绿地土壤的黑碳含量随着绿地年龄(即保持相对稳定的绿地景观的持续时间)的增加而提升。绿地土壤黑碳含量的时空分布异质性是由于不同区域人类

生活生产活动碳排放强度不同,以及绿地距黑碳排放源距离差异所导致^[35]。因此,隔离绿带、通风绿楔等的合理布局,可阻隔黑碳排放源,进而降低大气黑碳气溶胶含量,同时促进空气流动,更好地发挥城市绿地碳汇功能。

2.2 构建绿色交通网络,引导低碳出行

以步行和骑行为主的绿色慢行交通方式有助于降低私家车出行产生的 CO_2 排放量。城市绿道是线性城市开放空间,其景观要素形态、结构与慢行系统结构天然契合,因而对于引导居民低碳绿色出行具有重要意义。汪小琦等^[37]提出应构建多层次渗透化绿道网络,营造开放舒适的公共慢行空间,进而提升居民低碳出行效率,同时增强公共空间活力。张天洁等^[38]通过分析新加坡城市绿道,发现由于绿道穿过居民区,为非机动车旅行提供了替代路线,居民可以通过绿道前往目的地,从而降低碳排放量。

通过构建绿道网络体系,形成联系城市内部公共绿地与外部区域绿地之间的绿色交通网络,既可起到防止城市无序蔓延、优化城市生态环境的作用,又可为居民提供绿色开敞空间进行游憩、娱乐活动,引导城市居民使用低碳绿色的出行方式。

2.3 缓解热岛效应,降低周边环境碳排放

城市热岛效应格局与城市 CO_2 排放格局呈现显著正相关^[39]。城市绿地中的植物不仅能直接固定 CO_2 ,还能依靠蒸腾作用,在夏季为房屋遮阴,在冬季降低风速,从而削弱城市热岛效应,进而减少城市碳排放量。Loughner等^[40]通过城市建筑室内外的温差比较研究证实,树木遮阴可作为建筑被动冷却系统来节约能源。Zhang等^[41]计算了北京市 $16\ 577 \text{ hm}^2$ 绿地降温减排效应,发现其相当于每年减少 24.3 万 t 的 CO_2 排放量。此外,以绿地为基本结构的城市通风廊道亦可缓解热岛效应^[42],进而大幅减少附近区域空调使用造成的能源消耗,降低火力发电厂化石燃料使用量和碳排放量^[43]。但值得注意的是,绿地的降温效应受其形状类型、面积大小、植物种植密度等特征约束^[42,44],因而其间接碳汇功能也受到限制。

3 市域生态空间碳汇功能实现途径

3.1 保护区域自然生态空间的碳库存量

市域生态空间包括防护林地、湿地、自然保护区等重要自然生态要素。相较于人工生态空间,自然生态空间的碳储存能力更强^[45]。Nowak等^[28]对美国城市树木碳储量的研究表明,森林树木的平均碳密度是城市树木的平均碳密度的 2 倍。保护现存各类生态要素碳库存量,减少人为土地利用变化造成的碳排放量是强化区域碳汇的基础^[46]。

市域生态空间碳汇功能变化主要受到自然因素和土地利用变化的影响,其中人类活动导致的土地利用变化是城市碳源、碳汇空间产生异质性的关键因素^[47]。当土地覆被类型转变,尤其是自然地地表转化为不透水人工地表时,地上植物生物量和土壤状态便会发生变化。植物被砍伐替换的同时,地上植物生物量快速下降,土壤温度、水分含量、 pH 值等发生变化,土壤呼吸作用和有机碳组成随之变化,从而导致土壤碳储量降低^[48]。研究表明,城市建设用地固碳能力较弱,以不透水表面为特征的城市建设用地阻碍了土壤直接和间接的固碳能力过程^[49]。

此外,土地覆被转化过程会对生态空间碳汇效应产生持续影响。土地覆被转化过程产生的微小且持续的土壤碳释放量也会对土壤碳固定效应的发挥产生显著影响^[50]。即使土地覆被类型转化不彻底,其过程对碳汇效应的影响也非常显著^[51]。如在城市边缘乡村被城市居住区取代的城市化过程中,场地原有树木被砍伐的同时通常会栽植符合项目开发要求的树木,伴随原有生态系统被破坏,场地内碳库存量快速丢失。即使新栽植的树木在成长中会不断固定碳,但相比破坏现有树木带来短期大量碳库释放,新栽植的树木恢复原有碳库存量会滞后很长时间^[52]。而且,被破坏的生态系统所产生的相对损失的可逆性还存在不确定性^[50]。

3.2 优化市域生态空间碳汇格局

通过大量恢复并增加绿色生态空间面积以提升区域生态系统固碳能力的做法存在争议,并且其往往受到经济社会发展要求等客观条件限制而无法实现^[53]。Vaccari等^[54]针对

意大利佛罗伦萨市的研究表明,仅通过增加绿色生态空间面积来抵消城市CO₂总排放量的方式将占用整个城市甚至更多土地。尽管如此,研究表明优化城市景观格局将促进减排增汇,如冯源等^[55]分析了重庆市渝北区景观格局变化对城市碳收支空间异质性特征的影响,认为调整土地利用结构、节约土地资源、提高土地资源利用效率等方式有助于减排增汇。

识别城市碳源、碳汇关键节点和区域,通过优化生态系统质量或土地利用空间结构构建绿色生态空间碳汇格局,是市域尺度下碳汇提升的重要途径。汤煜等^[56]揭示了沈阳市地上碳储量空间分布特征,并从调整植被覆盖度视角出发针对性提出碳汇提升策略。Robinson等^[57]针对美国密歇根州人为活动导致的景观破碎化研究表明,当景观破碎化程度增加(即边缘面积比率指标升高),研究区碳储量随之以近似对数函数的形式增长。

4 城市绿地碳汇功能研究展望

4.1 城市绿地全生命周期碳汇功能评估框架

不论是基于样地实验还是模型评估,碳汇功能的精准量化是城市绿地减碳增汇研究的关键。目前,针对城市绿地碳汇的量化研究多沿用陆地自然生态系统碳汇组分评估要求,对城市绿地碳汇特征关注不足。例如,自然生态系统土壤有机碳的量化研究多集中于表层土壤组分,忽视了城市绿地表层与深层土壤都具有较高土壤有机碳含量的事实^[58-59],导致绿地土壤碳汇评估结果失准。

此外,关键数据难以获取也影响了碳汇评估的精准性。关键数据包括斑块尺度下城市绿地树木生理参数和不透水表面下表层土壤碳储量,市域尺度下生态空间不同年期植物凋落物、土壤碳密度数据等^[29]。此外,数据与场地的时空匹配程度低同样制约了碳汇评估准确性。研究表明,采用两类数据源的人均碳收支指标计算同一绿地的碳汇量结果竟相差30%,会直接影响碳汇测算准确性^[60]。

未来研究应开发面向城市绿地的全生命周期碳汇功能评估框架。以细化植物、土壤碳库等碳汇量化关键组分为基础,纵贯城市绿地规划、建设、管理、维护全生命周期,

通过多学科跨专业合作加强基础数据共享,开发适用于城市绿地多尺度碳汇功能的评估方法及校验手段,制定城市绿地碳汇评估的统一标准,提高评估精度,增加研究工作的可比性。

4.2 城市绿地碳汇与其他功能间权衡协同关系

城市绿地是气候调节、游憩娱乐、防灾避险等多重功能的载体,偏重城市绿地碳汇功能而忽略碳汇与其他功能间的作用关系,将限制城市绿地综合效益提升。如减少绿地斑块中人工草坪面积的维护管理措施,尽管此种措施有利于减排增汇,但忽视了人工草坪所发挥的景观美化功能。

城市绿地不同功能间的作用关系可以分为2种。1)基于共同驱动因素的相互作用关系。如在城区绿地系统尺度下,受限于绿地面积阈值,空间结构是城市绿地系统截留黑碳气溶胶、通风调温、建设慢行体系等功能的主要抓手,但不同功能对空间结构的响应存在差异,进而表现出共同增益或此消彼长的权衡关系。2)直接系统作用关系。如市域尺度生态空间,森林在生长过程中碳固定量增加的同时会导致土壤储水量下降,导致生态空间产水功能降低^[61]。碳循环是生态系统关键物质循环过程之一,是生态系统多重功能得以发挥的内在动因,与城市绿地多重效益实现紧密相关。当前,绿地碳汇研究聚焦于碳汇功能自身分析研判^[53],鲜有从多尺度角度分析碳汇与其他功能的权衡协同关系,不利于促进城市绿地生态-社会-经济功能共同提升。

未来应关注城市绿地多重功能间权衡与协同关系研究,尝试建立涵盖城市绿地多重功能的综合规划模型,以表征在不同尺度城市绿地规划方案中的潜在碳汇、游憩、景观等效益,促进城市绿地多功能协同增益。

4.3 城市绿地碳汇功能景观格局驱动机制

景观格局是市域生态空间尺度影响碳汇功能提升的关键因素。现有研究多聚焦于归一化植被指数、绿地面积等数量结构因素影响^[45,62],对景观格局影响因素关注不足。

相较于调整数量结构,调整景观格局更有利于降低生态系统管理成本^[63]。但如何有

效表征景观格局的生态学意义,并识别影响碳汇的关键景观格局指标是当前研究面临的首要问题。另外,城市绿地的碳汇功能受地理、气候、植物等多重因素共同影响,如何控制上述因素对景观格局研究的干扰需要进一步探索。景观格局对绿地碳汇功能的影响具有尺度依赖性,因而明确碳汇功能的景观格局驱动机制研究的适宜尺度也十分关键。

未来研究应探索碳汇景观格局驱动机制研究范式,积累并梳理多样化案例研究成果,降低自然因素差异引起的不确定性,厘清景观格局对碳汇功能的作用机制,辅助大尺度生态空间科学规划与管控。

5 讨论

城市绿地碳汇实现途径具有多尺度特征,研究各尺度城市绿地碳汇实现机理及途径,有助于国土空间规划、城市绿地系统规划、社区绿地建设管理等减排增汇目标的实现。

笔者梳理了促进城市绿地碳汇提升的重要举措,包括科学配植植物群落,实施低碳绿地规划建设管理措施,加强绿地斑块碳汇;合理进行绿地总体布局,构建绿地生态网络,加强绿道建设,引导绿色出行;注重绿地形态和绿地增量提质,缓解城市热岛效应;保护区域生态空间,识别碳源分布,优化碳汇空间格局等。

未来应关注城市绿地全生命周期碳汇功能评估框架研究,碳汇与其他功能间的作用关系及碳汇功能景观格局驱动机制研究。同时,值得注意的是,城市绿地碳汇只是“生态固碳”的一种路径,只有结合其他节能减排技术,如能源结构调整、重点领域减排和金融减排支持等,才能综合实现“双碳”目标。

参考文献 (References):

- [1] WMO. WMO Provisional Report on the State of the Global Climate 2021[EB/OL]. (2021-10-31)[2022-03-15]. <https://reliefweb.int/report/world/wmo-provisional-report-state-global-climate-2021>.
- [2] United Nations. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) [EB/OL]. (1994-03-21) [2022-03-15]. https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/conveng.pdf.

- [3] 王小涵, 张桂莲, 张浪, 等. 城市绿地土壤固碳研究进展[J]. 园林, 2022, 39(1): 18-24.
- [4] 史琰, 葛滢, 金荷仙, 等. 城市植被碳固存研究进展[J]. 林业科学, 2016, 52(6): 122-129.
- [5] 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(6): 23-26.
- [6] JAMIRSAH N, SAID I, JAAFAR B, et al. Carbon Footprint of Built Features and Planting Works During Construction, Maintenance and Renewal Stages at Urban Parks in Petaling Jaya, Selangor[J]. Pertanika Journal of Science and Technology, 2021, 29(1): 387-406.
- [7] MCPHERSON E G, KENDALL A. A Life Cycle Carbon Dioxide Inventory of the Million Trees Los Angeles Program[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2014, 19(9): 1653-1665.
- [8] LINDÉN L, RIIKONEN A, SETÄLÄ H, et al. Quantifying Carbon Stocks in Urban Parks Under Cold Climate Conditions[J]. Urban Forestry and Urban Greening, 2020, 49(prepublish): 126633.
- [9] STROHBACH M W, ARNOLD E, HAASE D. The Carbon Footprint of Urban Green Space: A Life Cycle Approach[J]. Landscape and Urban Planning, 2012, 104(2): 220-229.
- [10] 于贵瑞, 何念鹏, 王秋凤, 等. 中国生态系统碳收支及碳汇功能: 理论基础与综合评估[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [11] REYNOLDS C C, ESCOBEDO J F, CLERICI N, et al. Does "Greening" of Neotropical Cities Considerably Mitigate Carbon Dioxide Emissions? The Case of Medellín, Colombia[J]. Sustainability, 2017, 9(5): 785-785.
- [12] LIU C, LI X. Carbon Storage and Sequestration by Urban Forests in Shenyang, China[J]. Urban Forestry and Urban Greening, 2012, 11(2): 121-128.
- [13] ANJALI K, KHUMAN Y S C, SOKHI J. A Review of the Interrelations of Terrestrial Carbon Sequestration and Urban Forests[J]. AIMS Environmental Science, 2020, 7(6): 464-485.
- [14] VELASCO E, ROTH M, NORFORD L, et al. Does Urban Vegetation Enhance Carbon Sequestration?[J]. Landscape and Urban Planning, 2016, 148: 99-107.
- [15] MILLWARD A A, SABIR S. Benefits of a Forested Urban Park: What Is the Value of Allan Gardens to the City of Toronto, Canada?[J]. Landscape and Urban Planning, 2011, 100(3): 177-188.
- [16] 赵艳玲, 阚雨艳, 车生泉. 上海社区常见园林植物固碳释氧效应及优化配置对策[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2014, 32(4): 45-53.
- [17] 武文婷, 夏国元, 包志毅. 杭州市城市绿地固碳释氧价值量评估[J]. 中国园林, 2016, 32(3): 117-121.
- [18] 平晓燕, 王铁梅, 卢欣石. 农林复合系统固碳潜力研究进展[J]. 植物生态学报, 2013, 37(1): 80-92.
- [19] ESCOBEDO F, VARELA S, ZHAO M, et al. Analyzing the Efficacy of Subtropical Urban Forests in Offsetting Carbon Emissions from Cities[J]. Environmental Science and Policy, 2010, 13(5): 362-372.
- [20] MEXIA T, VIEIRA J, PRINCIPE A, et al. Ecosystem Services: Urban Parks Under a Magnifying Glass[J]. Environmental Research, 2018, 160: 469-478.
- [21] 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.
- [22] NAIR K R P, KUMAR M B, NAIR D V. Agroforestry as a Strategy for Carbon Sequestration[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2009, 172(1): 10-23.
- [23] 潘剑彬, 董丽, 晏海. 北京奥林匹克森林公园绿地二氧化碳摩尔分数季节和年度变化特征[J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(7): 76-81.
- [24] 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.
- [25] MONTAGNINI F, NAIR P K R. Carbon Sequestration: An Underexploited Environmental Benefit of Agroforestry Systems[J]. Agroforestry Systems, 2004, 61: 281-295.
- [26] BESNARD S, CARVALHAIS N, ARAIN M A, et al. Quantifying the Effect of Forest Age in Annual Net Forest Carbon Balance[J]. Environmental Research Letters, 2018, 13(12): 124018.
- [27] CHEN Z, YU G, WU Q. Effects of Climate and Forest Age on the Ecosystem Carbon Exchange of Afforestation[J]. Journal of Forestry Research, 2020, 31(2): 365-374.
- [28] 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.
- [29] 罗上华, 毛齐正, 马克明, 等. 城市土壤碳循环与碳固持研究综述[J]. 生态学报, 2012, 32(22): 7177-7189.
- [30] RACITI S M, HUTYRA L R, FINZI A C. Depleted Soil Carbon and Nitrogen Pools Beneath Impervious Surfaces[J]. Environmental Pollution, 2012, 164: 248-251.
- [31] SARAH P, RODEH Y. Soil Structure Variations Under Manipulations of Water and Vegetation[J]. Journal of Arid Environments, 2004, 58(1): 43-57.
- [32] SCHIFMAN L A, PRUES A, GILKEY K, et al. Realizing the Opportunities of Black Carbon in Urban Soils: Implications for Water Quality Management with Green Infrastructure[J]. Science of the Total Environment, 2018, 644: 1027-1035.
- [33] LORENZ K, PRESTON C M, KANDELER E. Soil Organic Matter in Urban Soils: Estimation of Elemental Carbon by Thermal Oxidation and Characterization of Organic Matter by Solid-State ¹³C Nuclear Magnetic Resonance (NMR) Spectroscopy[J]. Geoderma, 2005, 130(3): 312-323.
- [34] 马克明, 殷哲, 张育新. 绿地滞尘效应和机理评估进展[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4482-4491.
- [35] 徐福银, 包兵, 方海兰. 上海市城市绿地土壤中黑碳分布特征[J]. 土壤通报, 2014, 45(2): 457-461.
- [36] 刘兆云, 章明奎. 城市绿地年龄对土壤有机碳积累的影响[J]. 生态学杂志, 2010, 29(1): 142-145.
- [37] 汪小琦, 李星, 乔俊杰, 等. 公园城市理念下的成都特色慢行系统构建研究[J]. 规划师, 2020, 36(19): 91-98.
- [38] 张天洁, 李泽. 高密度城市的多目标绿道网络: 新加坡公园连接道系统[J]. 城市规划, 2013, 37(5): 67-73.
- [39] 黄焕春, 严思平. 城市热岛效应研究热点与前沿的可视化分析: 基于 CiteSpace 聚类分析[J]. 南京工业大学学报(社会科学版), 2021, 20(6): 94-110.
- [40] LOUGHNER C P, ALLEN D J, ZHANG D L, et al. Roles of Urban Tree Canopy and Buildings in Urban Heat Island Effects: Parameterization and Preliminary Results[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2012, 51(10): 1775-1793.
- [41] ZHANG B, XIE G D, GAO J X, et al. The Cooling Effect of Urban Green Spaces as a Contribution to Energy-Saving and Emission-Reduction: A Case Study in Beijing, China[J]. Building and Environment, 2014, 76: 37-43.
- [42] 周媛, 石铁矛, 胡远满, 等. 基于城市气候环境特征的绿地景观格局优化研究[J]. 城市规划, 2014, 38(5): 83-89.
- [43] 徐洪, 杨世莉. 城市热岛效应与生态系统的关系及减缓措施[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2018, 54(6): 790-798.
- [44] 陈利顶, 李秀珍, 傅伯杰, 等. 中国景观生态学发展历程与未来研究重点[J]. 生态学报, 2014, 34(12): 3129-3141.
- [45] 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.
- [46] 林姚宇, 吴佳明. 低碳城市的国际实践解析[J]. 国际城市规划, 2010, 25(1): 121-124.
- [47] XU Q, YANG R, DONG Y X, et al. The Influence of Rapid Urbanization and Land Use Changes on Terrestrial Carbon Sources/Sinks in Guangzhou, China[J]. Ecological Indicators, 2016, 70: 304-316.
- [48] BYRNE L B, BRUNS M A, KIM K C. Ecosystem Properties of Urban Land Covers at the Aboveground-Belowground Interface[J]. Ecosystems, 2008, 11(7): 1065-1077.
- [49] 刘波, 李学斌, 陈林, 等. 基于文献计量分析的土壤固碳研究进展[J]. 土壤通报, 2021, 52(1): 211-220.
- [50] GOLDSTEIN A, TURNER W R, SPAWN S A, et al. Protecting Irrecoverable Carbon in Earth's Ecosystems[J]. Nature Climate Change, 2020, 10(4): 287-295.
- [51] CHAPLIN-KRAMER R, RAMLER I, SHARP R, et al. Degradation in Carbon Stocks Near Tropical Forest Edges[J]. Nature Communications, 2015, 6(1): 10158.
- [52] VAUGHN R M, HOSTETLER M, ESCOBEDO F J, et al. The Influence of Subdivision Design and Conservation of Open Space on Carbon Storage and Sequestration[J]. Landscape and Urban Planning, 2014, 131: 64-73.
- [53] 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(4): 69-76.
- [54] VACCARI F P, GIOLI B, TOSCANO P, et al. Carbon Dioxide Balance Assessment of the City of Florence (Italy), and Implications for Urban Planning[J]. Landscape and Urban Planning, 2013, 120: 138-146.
- [55] 冯源, 朱建华, 刘华妍, 等. 基于土地利用变化的县域碳收支空间格局预测[J]. 江西农业大学学报, 2020, 42(4): 852-862.
- [56] 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(4): 1387-1398.
- [57] ROBINSON D T, BROWN D G, CURRIE W S. Modelling Carbon Storage in Highly Fragmented and Human-Dominated Landscapes: Linking Land-Cover Patterns and Ecosystem Models[J]. Ecological Modelling, 2009, 220(9-10): 1325-1338.
- [58] LORENZ K, KANDELER E. Biochemical Characterization of Urban Soil Profiles from Stuttgart, Germany[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(7): 1373-1385.
- [59] 张青青, 伍海兵, 梁晶. 上海市绿地表层土壤有机碳储量的估算[J]. 土壤, 2020, 52(4): 819-824.
- [60] VELASCO E, PERRUSQUIA R, JIMÉNEZ, et al. Sources and Sinks of Carbon Dioxide in a Neighborhood of Mexico City[J]. Atmospheric Environment, 2014, 97: 226-238.
- [61] 傅伯杰, 于丹丹. 生态系统服务权衡与集成方法[J]. 资源科学, 2016, 38(1): 1-9.
- [62] 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.
- [63] LYU R F, ZHAO W P, TIAN X L, et al. Non-linearity Impacts of Landscape Pattern on Ecosystem Services and Their Trade-offs: A Case Study in the City Belt Along the Yellow River in Ningxia, China[J]. Ecological Indicators, 2022, 136: 108608.