专题学术主持人 Guest Editors of the Special

李倞 LI Liang
北京林业大学园林学院教授、博士生导师 / 本刊特约编辑
Professor and doctoral supervisor in the School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, and contributing editor of this journal

徐昉 XU Fang
北京林业大学园林学院讲师
Lecturer in the School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University

张桂莲，仲启铖，张浪 . 面向碳中和的城市园林绿化碳汇能力建设研究 [J]. 风景园林，2022，29（5）：12-16.

面向碳中和的城市园林绿化碳汇能力建设研究

Research on Carbon Sink Capacity Construction via Urban Landscaping for Carbon Neutrality

张桂莲 仲启铖 张浪 *
ZHANG Guilian, ZHONG Qicheng, ZHANG Lang*

开放科学（资源服务）标识码（OSID）

中图分类号：TU985.14
文献标识码：A
文章编号：1673-1530(2022)05-0012-05
DOI：10.14085/j.fjyl.2022.05.0012.05
收稿日期：2021-11-11
修回日期：2022-03-08

张桂莲 / 女 / 博士 / 上海市园林科学规划研究院高级工程师 / 上海市林业碳汇计量监测中心主任 / 研究方向为城市园林绿化碳汇监测与评估
ZHANG Guilian, Ph.D., is a senior engineer in Shanghai Academy of Landscape Architecture Science and Planning, and the director of the Shanghai Forestry Carbon Sink Measurement and Monitoring Centre. Her research focuses on carbon sink monitoring and assessment in urban landscaping and greening.

仲启铖 / 男 / 博士 / 上海市园林科学规划研究院高级工程师 / 上海市林业碳汇计量监测中心技术员 / 研究方向为城市园林绿化碳汇监测与评估
ZHONG Qicheng, Ph.D., is a senior engineer in the Shanghai Academy of Landscape Architecture Science and Planning, and a technician in the Shanghai Forestry Carbon Sink Measuremen and Monitoring Centre. His research focuses on carbon sink monitoring and assessment in urban landscaping and greening.

张浪 / 男 / 博士 / 上海市园林科学规划研究院院长、教授级高级工程师 / 上海市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业和草原局重点实验室主任 / 本刊编委 / 研究方向为生态园林规划设计与技术研究
通信作者邮箱（Corresponding author Email）： zhanglang2018@hotmail.com
ZHANG Lang, Ph.D., professor-level senior engineer, is the dean of Shanghai Academy of Landscape Architecture Science and Planning, the director of Shanghai Engineering Research Center of Challenging Urban Sites, the director of Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Ecological Landscaping of Challenging Urban Sites, and a editorial board member of this journal. His research focuses on planning, design and technology of ecological landscape.

摘要：城市园林绿化作为人口高密、经济发达地区最主要的绿色生态资源，具有不可或缺的碳汇价值和多重生态系统服务功能，在推进中国各大城市发展绿色低碳、促进碳中和愿景实现过程中将发挥越来越重要的作用。通过梳理和总结城市园林绿化碳汇领域的最新政策和研究进展，剖析当前中国在城市园林绿化碳汇能力建设中存在的难点和问题，提出面向碳中和的城市园林绿化碳汇能力建设的主要任务和实践路径，以期优化城市园林绿化建设和管理，增强园林绿化对碳中和的贡献。

关键词：风景园林；城市园林绿化；气候变化；可持续发展；碳中和；碳汇
基金项目：国家自然科学基金（编号 32171569）；上海市科委科技创新行动计划课题（编号 19DZ1203301）；上海市绿化和市容管理局科研项目（编号 G220201）

Abstract: As the most important green ecological resource in densely populated and economically developed regions, urban landscaping has indispensable carbon sink value and multiple ecosystem service functions, and will play an increasingly important role in promoting green and low-carbon development of major cities in China and helping achieve the vision of carbon neutrality. This research, through reviewing and summarizing the latest policies and research progress in the field of urban landscaping carbon sink, analyzes the difficulties and problems in the construction of carbon sink capacity via urban landscaping in China, and proposes the main tasks and implementation paths of carbon sink capacity construction via urban landscaping for carbon neutrality, in hope of optimizing the construction and management of urban landscaping and strengthening the contribution thereof, to carbon neutrality.

Keywords: landscape architecture; urban landscaping and greening; climate change; sustainable development; carbon neutrality; carbon sink
Fund Items: The National Natural Science Fund of China (No. 32171569); The Science and Technology Innovation Action Plan of Shanghai Science and Technology Commission (No. 19DZ1203301); Scientific Research Project of Shanghai Greening and City Appearance Administration (No. G220201)

气候变化是全球性重大环境问题，是人类生存和可持续发展所面临的严峻挑战[1]。2020年9月，习近平主席在第七十五届联合国大会上郑重宣示，中国CO_2排放力争于2030年前达到峰值，2060年前实现碳中和。应对气候变化关键在于“控碳”，要先实现碳达峰，而后实现碳中和，后者更加重要，也更为困难。为实现碳中和，除通过调整产业结构、提高能源利用效率、推广新能源等措施切实降低CO_2等温室气体排放外，还须采用植树造林、园林绿化、生态修复等基于自然的途径抵消温室气体排放，如进一步提升森林、湿地、绿地等生态系统的碳汇能力[2-5]。研究表明，中国陆地生态系统年度碳汇量大约可抵消人为碳源的10%~40%[6-7]。森林是陆地生态系统固碳的主体，年度碳汇量（CO^2固定量）可达15.9亿t[8]。

城市是碳排放强度最高的区域，尽管其面积只占全球陆域总面积的3%，却承载了超过1/2的全球人口，产生了超过70%的碳排放[9]。城市园林绿化空间包含城市市域范围内的森林、湿地、绿地、水体等生态系统，是城市范围内具有固碳作用的重要生态空间，在减缓和适应气候变化过程中发挥着重要作用[10]。绿色植物通过光合作用吸收大气中的CO_2，并将其固定在植被、土壤与水体中，从而减少大气中的CO_2浓度[11-13]。此外，作为绿色基础设施的重要组分，城市园林绿化空间还具有调节小气候、涵养水源、吸收污染物等生态功能，从而间接降低建设灰色基础设施所导致的碳排放[14-16]。因此，如何将城市园林绿化与应对气候变化有机结合，实施城市生态保护与修复，巩固提升城市园林绿化碳汇能力，已成为中国各大城市践行绿色低碳发展理念，谋划碳达峰、碳中和工作布局的重要课题。

1 城市园林绿化碳汇能力建设进展

1.1 城市园林绿化碳汇相关政策

随着中国正式提出碳达峰、碳中和承诺，2020年12月的中央经济工作会议、2021年3月的中央财经委员会第九次会议先后指出，开展大规模国土绿化行动，提升生态系统碳汇能力是做好碳达峰、碳中和工作的重要内容之一。2021年6月2日，《国务院办公厅关于科学绿化的指导意见》提出，要科学开展大规模国土绿化行动，增强生态系统功能和生态产品供给能力，提升生态系统碳汇增量[17]。2021年10月24日，中共中央、国务院下发的《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》提出：“建设城市生态和通风廊道，提升城市园林绿化水平；严守生态保护红线，严控生态空间占用，稳定现有森林、草原、湿地、海洋、土壤、冻土、岩溶等固碳作用；开展山水林田湖草沙一体化保护和修复，深入推进大规模国土绿化行动。”[18]2021年10月28日，国务院下发的《2030年前碳达峰行动方案》，将碳汇能力巩固提升行动列为“碳达峰十大行动之一”[19]。由此可见，包括城市园林绿化碳汇在内的生态系统碳汇能力建设已经成为我国碳达峰、碳中和工作顶层设计中明确的重点任务之一。

1.2 城市园林绿化碳汇提升措施

1.2.1 优化空间布局

构建科学合理的城市园林绿化空间是巩固和提升城市生态系统碳汇绩效的重要基础[20]。传统的绿地系统规划大多局限在城市建成区，以统筹和管控绿地率、人均绿地面积等为主要手段。为有效提升城市生态系统碳汇绩效，在编制园林绿化相关规划时，应将其与国土空间规划和国土生态空间修复规划有效衔接，积极践行“公园城市”理念，合理布局城市园林绿化空间，建设城市生态廊道和通风廊道，形成城市绿地生态网络[21-22]。构建布局合理、功能复合的城市绿地生态网络，既能增加城市园林绿化面积，有效发挥城市绿地植被、土壤和水体的固碳作用，提升自然固碳能力；又能调节和改善城市热岛效应，减少建筑能耗，发挥海绵作用，削减地表径流，间接实现降低城市碳排放的作用[23-25]。

1.2.2 增强植被固碳能力

绿色植物通过光合作用吸收和固定大气中的CO_2，是城市园林绿化空间固碳作用的主体[26-27]。存储在绿色植物中的碳为植被碳库，可分为地上部分生物量和地下部分生物量两大碳库。地上部分又可分为乔木层、灌木层、地被层等碳库[10]。提高园林绿化植被固碳能力的关键在于增加植被覆盖率和碳密度，包括提高树冠覆盖率、增加乡土适生树种数量和种类、优化绿化树木栽培密度和规格等[28-29]。在园林绿化项目建设管理中的措施包括植物种类选择、立地条件改良、植物群落配置和养护管理等方面，常用的技术措施包括采用高效固碳乡土植物、提倡深根性植物、推广复层混交种植模式、科学开展立体绿化等[30-33]。

1.2.3 提升土壤碳固持

采取土壤修复等管理措施，提升土壤碳固持能力，是应对全球气候变化的重要途径[34]。城市土壤所固持的碳通常为城市植被的几倍到十几倍，是城市园林绿化空间中最大的碳库。增强城市土壤的碳固持能力，将对减缓城市能源消耗、碳排放起到非常积极的作用[35]。与其他陆地生态系统土壤碳储量或碳库研究相比，目前对城市绿地土壤碳固持提升的研究还相对较少。利用园林绿化废弃物制备生物炭，或进行堆肥生产有机肥料、栽培基质和土壤改良剂，用于城市园林绿化建设，可以改良园林绿化土壤的肥力、生物活性和物理结构，促进植物健康生长，在提升城市绿地土壤碳固持能力方面具有较好的发展潜力[36]。

1.3 城市园林绿化碳汇计量监测

对城市园林绿化碳汇进行计量监测，能够直观反映其减缓和应对气候变化的价值，为有效管理和提升其碳汇能力提供科学依据[37]。目前，中国城市园林绿化碳汇的本底情况仍然不清楚，相关监测评估主要借鉴林业碳汇的方法[38]。准确计量和监测城市园林绿化碳汇的规模、组成和分布，理解其未来发展趋势，有利于城市绿化管理者和建设者开展面向碳中和的城市绿地规划、设计、建设和管养[39]。

在监测方法方面，国内外已有一系列研究从单株树木、单块绿地、城市片区和整个城市等尺度，采用样地清查法、同化量法、微气象法、遥感估测法以及生态模型等方法，对各类城市园林绿化空间的碳储量和碳汇量进行监测和评估[40-44]。在计量标准方面，与园

林绿化碳汇相关性较强的技术标准多集中在林业领域，如《IPCC关于土地利用、土地利用变化和林业方面的优良做法指南》[45]、《林业碳汇计量监测技术规程》[46]、《城市森林碳汇调查及数据采集技术规范》[47]等。但如何准确、定量估算城市园林绿化碳汇的总量、组成及其分布，尚无专门的技术标准和实施范式。

2 城市园林绿化碳汇能力建设的问题与挑战

党的十八大以来，城市建设领域始终坚持以人民为中心的发展思想，将城市园林绿化作为城市重要的基础设施，通过园林城市建设，引导各地不断拓展城市绿地规模，提高城市园林绿化水平。截至2020年底，全国城市建成区绿地面积超过230万 hm^2，较2012年前增加近50%，切实改善了城市生态环境，提升了城市宜居品质[48]。站在新的历史起点，为全面贯彻落实新发展理念、推动城市生态文明建设、实现碳达峰、碳中和目标，须进一步巩固和提升城市园林绿化水平及其碳汇能力。

2.1 城市园林绿化碳中和路径缺乏顶层规划

2021年10月，党中央、国务院先后下发了关于做好碳达峰、碳中和工作的纲领性文件《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》[18]和推进碳达峰工作的总体部署方案《2030年前碳达峰行动方案》[19]，提出了推进城乡建设和管理模式低碳转型、持续巩固提升生态系统碳汇能力的要求。然而，目前各级城市生态建设和园林绿化管理部门，对如何在具体工作中贯彻落实上述文件精神还缺乏依据，对城市园林绿化碳汇能力建设应采用怎样的发展路径尚不明确。为有效服务城市绿色低碳转型和社会经济高质量发展，切实提升城市园林绿化减缓和应对气候变化的能力，需在国家和地方层面制定城市园林绿化促进碳中和的相关规划和行动方案。

2.2 城市可新增园林绿化空间不足、立地条件差

当前，随着常住人口城镇化率超过60%，中国进入城市更新的重要时期。城市发展由大规模增量建设，转为存量提质改造和增量结构调整并重[49]。2017年，中央城市工作会议对开展生态修复、城市修补提出了明确要求。然而，现阶段城市在开展园林绿化时往往存在着如下突出矛盾：一方面，高度城市化区域有着实现绿化生态建设目标，改善人居环境品质的强烈需求；另一方面，这些区域同时也面临绿化增量空间有限、零散、立地条件困难等现状问题[50]。因此，如何在难以满足植物正常生长的困难立地上，开展园林绿化营建和生态修复，已成为城市园林绿化建设的突出性政策和技术难题。

2.3 城市园林绿化碳汇计量监测水平有待提升

目前，中国的林业碳汇计量监测体系相对较为成熟，针对城市森林碳汇的计量监测已有相关技术标准发布实施[46-47, 51]。然而，城市园林绿化空间的异质性较强，受人为影响更大，其分类、结构和功能与城市森林存在较多不同之处，不能简单照搬城市森林的碳汇计量监测标准进行城市园林绿化的碳汇评估。同时，国内外已有的城市绿地碳汇估算方法，大部分对数据要求较高，计算过程复杂，且针对性不强，难以进行横向比较。因此，有必要研究兼具科学性和实用性的城市园林绿化碳汇计量监测技术方法，为准确核算城市园林绿化空间的碳储量和碳汇量提供技术支撑。

2.4 城市园林绿化碳汇管理体制机制亟待优化

城市园林绿化涵盖城市绿地、城市森林、水域湿地等多类生态空间，涉及绿化、林业、水务、住建、农业等管理部门[52]。为切实加强城市园林绿化碳汇能力建设，须加强组织领导、明确职责分工、完善协调机制。另外，在中国现行的法规体系中，与城市生态系统碳汇能力巩固提升相关内容分散在《城乡规划法》《环境保护法》《森林法》《城市绿化条例》等单行法中，城市园林绿化碳汇能力建设无专门法律支撑。为明确其法律地位、工作目标、部门职责和监督考核机制等，需将城市生态系统碳汇能力巩固提升的相关内容纳入国家应对气候变化综合立法中，或对现行相关法规进行适当修订，同时加强相关法规之间的协调，从而为城市园林绿化碳汇建设提供法制保障。

3 城市园林绿化碳汇能力建设的任务与路径

围绕“2030碳达峰”“2060碳中和”目标，结合目前城市园林绿化建设及碳汇能力提升的发展需求，本研究从生态空间布局、生态保护修复、增汇关键技术及监测核算体系等方面提出4点建设任务与路径。

3.1 优化生态空间布局，构建绿地生态网络

针对积极推进山水林田湖草一体化保护修复的目标，在“多规合一”国土空间规划体系下，保护和统筹城市全域绿地、林地、湿地等生态要素，推动城乡区域融合发展，持续提升城市绿色生态空间的系统性、均衡性和功能性。践行“公园城市”发展理念，完善以国家公园、区域公园、城市公园、地区公园、社区公园、微型公园为主体的城乡公园体系，进一步提升中心城区人均公园绿地面积和绿地覆盖率。同时，依托现有城市绿地、道路、河流及其他公共空间，打通城市生态和通风廊道，建设多层级、多类型廊道和绿道体系，构建多层次、网络化、功能复合的城市生态空间体系，完善城市生态安全格局，为促进城市碳达峰、碳中和目标实现提供优质生态空间。

3.2 推进城市有机更新，实施城市生态修复

针对实施城市更新行动、加强城市生态修复的目标，可围绕城市多层级、多类型城乡公园体系、廊道体系以及绿道体系建设，梳理可用于生态修复和园林绿化的土地资源，对城市受损山体、水体和废弃地等进行科学复绿。由于城市生态空间拓展受限，要充分利用城市困难立地、边角地、房前屋后等适宜“见缝插绿”的有限空间，因地制宜地增加园林绿化面积，提升城市绿化覆盖率。同时，鼓励采用屋顶花园、垂直绿化等方式，增加城市总体绿量，增强建筑集水、隔热性能，间接减少碳排放。此外，强化湿地生态保护和修复，可遏制天然湿地资源功能退化趋势，

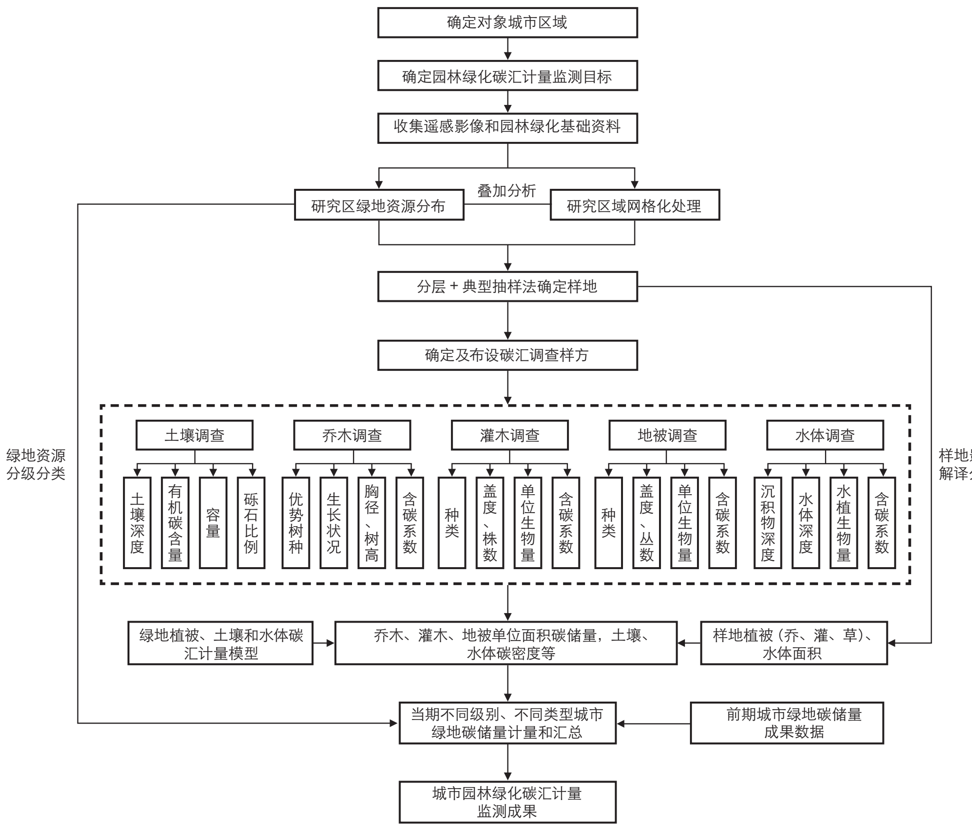
探索开展城市湿地系统修复工程，可提升湿地碳汇水平和生态服务功能。

3.3 提升园林绿化质量，增强绿地碳汇能力

针对城市绿地固碳能力和储碳水平的提升目标，可考虑以下 3 个路径：1）在新建园林绿化项目时，严格遵照城市自然地理条件及气候变化趋势，科学筛选适宜的园林绿化树种，合理设计栽植树种、密度和龄组，选用长寿命树种和高效固碳乡土树种，增加近自然复层异龄混交林的比例；2）针对已建的低质、低效园林绿化景观，采取措施优化其群落结构和养护管理方式，提升其植被质量和碳汇水平；3）采用园林绿化废弃物和湿垃圾资源化产物改良土壤、增加土壤碳固持能力，实现减源、增汇并举。

3.4 完善计量监测体系，提高科技支撑能力

针对应对气候变化领域“可测量、可报告、可核查”的原则和要求，城市园林绿化建设须不断完善碳汇监测网络和数据库，并加强对各类监测数据的评估分析和成果应用，摸清城市园林绿化的碳汇能力和增汇潜力。本研究参考国际、国内相关技术方法[45-47]，构建了城市园林绿化碳汇计量监测技术路线（图 1）。具体须根据城市园林绿化空间的类型、等级、结构和养护管理水平等，对乔木、灌木、地被、土壤和水体五大碳库进行相关参数的监测、模型的构建及方法学的研究。通过量化监测，以分析城市园林绿化碳汇与绿色空间面积、质量和分布格局，绿化植物的生理生态特征，城市微气候和立地条件以及人为管理措施和强度等之间存在的相互关系，提出碳汇能力提升的关键环节和针对性策略。同时，还须开展园林绿化增汇减源关键技术攻关和适配集成研究，形成成套化的增汇减排技术体系和操作指南，加强城市园林绿化在实现城市碳中和愿景中的科技支撑能力。



1

1 城市园林绿化碳汇计量监测技术路线图[45-47]
Technical roadmap for measurement and monitoring of urban landscaping carbon sink[45-47]

4 总结和思考

碳达峰、碳中和战略的提出，体现了中国作为负责任大国的担当，标志着中国生态文明建设进入了新的发展阶段。“绿水青山就是金山银山”，生态优先、绿色低碳的高质量发展道路已成为中国在建设社会主义现代化强国征程中的必然选择。城市作为碳排放强度最为集中的地区，需要更积极主动地开展生产生活方式的变革。城市园林绿化空间作为城市范围内具有固碳作用的重要生态空间，在减缓和适应气候变化方面将发挥越来越重要的作用。

本研究聚焦城市园林绿化领域，基于“双碳”政策和城市园林绿化碳汇相关研究进展，分析了城市园林绿化碳汇能力建设现状、面临的问题与挑战；特别是着眼未来碳中和目标，从优化生态空间布局、提升生态保护修复水平、攻关增汇关键技术及构建监测核算体系等方面，提出了城市园林绿化碳汇能力建设的主要路径，以期为生态城市建设、生态文明可持续发展及“双碳”目标的实现提供思路借鉴。

值得注意的是，城市园林绿化碳汇能力的建设需要处理好增汇和减排的关系。在城市园林绿化建设和养护管理过程中，也会产生化石能源消耗和温室气体排放[29]。为增加城市园林绿化的碳汇水平，应以绿色低碳为导向，从规划设计、施工和养护管理等环节着手，切实降低园林绿化项目全生命周期的碳排放[29, 53]。对建成的城市园林绿化开展精细化和适应性管理，提升其可持续发展水平[54]。在提高城市园林绿化面积和质量的同时，实现低投入、低成本、低能耗，获得良好的生态效益和社会效益[55-56]。

同时，城市园林绿化管理部门应将园林绿化碳汇相关指标纳入发展规划中，或编制专项规划，研究制定城市园林绿化碳汇建设和能力提升的总体目标、分阶段目标、实施方案、重点项目和保障措施等。理顺城市园林绿化碳汇工作机制，将加强城市园林绿化碳汇能力建设和管控的内容纳入相关制度中，制定增强城市园林绿化碳汇能力的激励政策，创新社会资本投融资机制。多渠道、多途径开展碳汇相关知识的宣传教育和科普活动，提高全民绿色低碳生产生活意识。

参考文献 (References)：

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
[2] 张颖，李晓格，温亚利 . 碳达峰碳中和背景下中国森林碳汇潜力分析研究 [J]. 北京林业大学学报，2022，44（1）：38-47.
[3] 王法明，唐剑武，叶思源，等 . 中国滨海湿地的蓝色碳汇功能及碳中和对策 [J]. 中国科学院院刊，2021，6（3）：241-251.
[4] 安吉，李婷，傅翔，等 . 城市化梯度带绿地土壤碳氮的空间分布特征 [J]. 生态学杂志，2019，38（9）：2780-2787.
[5] 张小全，谢茜，曾楠 . 基于自然的气候变化解决方案 [J]. 气候变化研究进展，2020，16（3）：336-344.
[6] PIAO S, CIAIS P, FRIEDLINGSTEIN P, et al. Net Carbon Dioxide Losses of Northern Ecosystems in Response to Autumn Warming[J]. Nature, 2008, 451: 49-52.
[7] WANG J, FENG L, PALMER P I, et al. Large Chinese Land Carbon Sink Estimated from Atmospheric Carbon Dioxide Data[J]. Nature, 2020, 586: 720-723.
[8] 王兵，牛香，宋庆丰 . 基于全口径碳汇监测的中国森林碳中和能力分析 [J]. 环境保护，2021，49（16）：30-34.
[9] 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.
[10] 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（8）：18-24.
[11] 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.
[12] 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.
[13] 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（3）：439-447.
[14] 张桂莲 . 上海市森林生态服务价值评估与分析 [J]. 中国城市林业，2016，14（3）：33-38.
[15] 仲启钺，张桂莲，崔心红 . 崇明三岛森林生态系统服务价值动态评估 [J]. 中国城市林业，2018，16（4）：22-27.
[16] 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（3）：81-86.
[17] 国务院办公厅 . 国务院办公厅关于科学绿化的指导意见（国办发〔2021〕19 号）[EB/OL].（2021-06-02）[2021-11-11]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-06/02/content_5614922.htm.
[18] 新华社 . 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 [EB/OL].（2021-10-24）[2021-11-11]. http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm.
[19] 国务院办公厅 . 国务院关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知（国发〔2021〕23 号）[EB/OL].（2021-10-26）[2021-11-11]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.
[20] 宗芮 . 基于碳汇绩效的西安市域绿地系统空间布局模式研究 [D]. 西安：西安建筑科技大学，2018.
[21] 张浪 . 构建城市市域生态网络系统 [J]. 园林，2019(6): 1.
[22] 张浪 . 城市绿地系统布局结构模式的对比研究 [J]. 中国园林，2015，31（4）：50-54.
[23] 成雅田，吴昌广 . 基于局地气候优化的城市蓝绿空间规划途径研究进展 [J]. 应用生态学报，2020，31（11）：3935-3945.
[24] LIU J, ZHANG L, ZHANG Q P, et al. Predicting the Surface Urban Heat Island Intensity of Future Urban Green Space Development Using a Multi-scenario Simulation[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 66: 102698.
[25] SHAO W W, LIU J H, YANG Z X, et al. Carbon Reduction Effects of Sponge City Construction: A Case Study of the City of Xiamen[J]. Energy Procedia, 2018, 152: 1145-1151.
[26] 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.
[27] 仲启钺，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（3）：524-532.
[28] 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.
[29] 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.
[30] 宋坤，郭雪艳，王泽英，等 . 上海城市近自然森林的重建动态 [J]. 生态学杂志，2020，39（4）：1075-1081.
[31] PEI N C, WANG C, SUN R L, et al. Towards an Integrated Research Approach for Urban Forestry: The Case of China[J]. Urban Forestry and Urban Greening, 2019, 46: 126472.
[32] 陈爱葵，陆剑，袁剑刚，等 . 屋顶绿地碳固定潜力的研究 [J]. 中山大学学报（自然科学版），2015，54（1）：89-95.
[33] 荣先林 . 基于低碳理念的园林植物景观设计关键技术及措施探究 [J]. 现代园艺，2018（18）：116-117.
[34] 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.
[35] 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.
[36] 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（4）：32-38.
[37] 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.
[38] 谢军飞，李薇 . 借鉴森林生态系统的园林绿地碳汇研究进展 [J]. 农业科技与信息（现代园林），2014，11（11）：14-21.
[39] 冀媛媛，罗杰威，王婷 . 建立城市绿地植物固碳量计算系统对于营造低碳景观的意义 [J]. 中国园林，2016，32（8）：31-35.
[40] PREGITZER C C, HANNA C, CHARLOP-POWERS S, et al. Estimating Carbon Storage in Urban Forests of New York City[J]. Urban Ecosystems, 2021, 25: 617-631.
[41] 张青云，吕伟娅，徐炳乾 . 华北地区城市绿地固碳能力测算研究 [J]. 环境保护科学，2021，47（1）：41-48.
[42] 赵倩，赵敏 . 城市化过程及其绿地储碳研究：以上海“城—郊—乡”样带为例 [J]. 长江流域资源与环境，2015，24（4）：531-538.
[43] 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.
[44] 易扬，张桂莲，张浪，等 . 基于高分二号遥感影像的城市植被三维绿量研究 [J]. 园林，2020（11）：2-7.
[45] PENMAN J, KRUGER D, GALBALLY I E, et al. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories[R/OL].(2001-06-15)[2021-11-11]. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/.
[46] 北京市质量技术监督局 . 林业碳汇计量监测技术规程：DB11/T 953-2013[S/OL].（2013-05-01）[2022-11-11]. http://www.bjdch.gov.cn/n2025399/n2513310/c2513706/part/2513707.pdf.
[47]. 上海市市场监督管理局 . 城市森林碳汇调查及数据采集技术规范：DB31/T 1232—2020[S/OL].（2020-07-06）[2022-11-11]. https://dbba.sacinfo.org.cn/stdDetail/120f19051dec6ef3f086d8de529aceadf1e7b9545aa49c018f0abc6c65700ddc.
[48] 中华人民共和国住房和城乡建设部 . 2020 年城乡建设统计年鉴 [M]. 北京：中国计划出版社，2021.
[49] 丁凡，伍江 . 城市更新相关概念的演进及在当今的现实意义 [J]. 城市规划学刊，2017（6）：87-95.
[50] 张浪 . 谈新时期城市困难立地绿化 [J]. 园林，2018（1）：2-7.
[51] 上海市市场监督管理局 . 城市森林碳汇计量监测技术规程: DB31/T 1234-2020[S/OL]. (2020-07-06) [2022-11-11]. https://dbba.sacinfo.org.cn/stdDetail/120f19051dec6ef3f086d8de529acead3c836dac782cae72ced1594ceaa8fa9b.
[52] 李晓策，张浪，张桂莲，等 . 城市生态系统管理体制与机制现状分析与对策 [J]. 上海建设科技，2018（5）：59-62，72.
[53] 杨茵 . 低碳园林在城市生态修复中发挥的作用：评《城市生态修复的低碳园林设计途径》[J]. 世界林业研究，2020，33（2）：117.
[54] 马明新 . 低碳式养护在沈阳园林绿地的应用 [J]. 园林，2014（5）：54-55.
[55] 黄柳菁，张颖，邓一荣，等 . 城市绿地的碳足迹核算和评估：以广州市为例 [J]. 林业资源管理，2017（2）：65-73.
[56] 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.

图表来源 (Sources of Figure)：

图 1 由作者根据参考文献 [45]~[47] 绘制。

（编辑 / 肖书文 李清清）