

碳中和背景下的城市绿地适应性规划探索：国际经验与前沿技术

An Exploration on Adaptive Planning of Urban Green Space in the Context of Carbon Neutrality: International Experience and Frontier Technologies

王 敏^{1,2,3,4*} 宋昊洋^{1,2}
WANG Min^{1,2,3,4*} SONG Haoyang^{1,2}

(1.同济大学建筑与城市规划学院景观学系, 上海 200092; 2.高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室水绿生态智能分实验中心, 上海 200092; 3.上海城市困难立地绿化工程技术研究中心, 上海 201499; 4.自然资源部大都市区国土空间生态修复工程技术创新中心土地整理中心, 上海 202155)

(1. Department of Landscape Architecture, College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai, China, 200092; 2. Eco-SMART LAB attached to Key Laboratory of Ecology and Energy-saving Study of Dense Habitat, Shanghai, China, 200092; 3. Shanghai Engineering Research Center of Landscaping on Challenging Urban Sites, Shanghai, China, 201499; 4. Ministry of Education, Technology Innovation Center for Land Space Eco-restoration in Metropolitan Area (MNR), Shanghai, China, 202155)

文章编号: 1000-0283(2023)01-0010-06

DOI: 10. 12193 / j. laing. 2023. 01. 0010. 002

中图分类号: TU986

文献标志码: A

收稿日期: 2022-10-29

修回日期: 2022-11-23

摘 要

在碳中和背景下, 如何有效推进城市空间减排增汇, 对城市绿地空间类规划提出了复杂挑战。在价值理性和工具理性的双重视角下, 梳理全球11个国家的30项相关规划行动, 重点对绿地适应性规划的国际经验进行归纳, 包括多效益协同、多层级传导、全周期覆盖等三个方面的转型发展; 进一步将国际经验与国内国土空间规划现状相结合, 构建碳中和背景下城市绿地适应性规划“目标—策略—指标”的总体技术框架, 提出面向城市绿地“市域—城区—街区—地块”四级管控层级, 差异化制定碳中和目标, 明确相适应的多尺度精准增效规划策略和多层级评估管控指标, 应用定量化“碳”核算、多情景“碳”模拟和智慧化“碳”监测三大关键技术体系, 为城市绿地规划实践的适应性转型探索提供专业支撑。

关键词

碳中和 ; 城市绿地规划 ; 适应性规划 ; 国际经验 ; 技术支撑

Abstract

In the context of carbon neutrality, how to effectively promote emission reduction and sink enhancement in urban space poses a complex challenge to the spatial planning of urban green space. Under the dual perspective of value rationality and instrumental rationality, this study compares 30 relevant planning actions in 11 countries around the world and focuses on the international experience of adaptive planning of urban green space, including the transformation towards multi-benefit synergy, multi-level transmission, and full-cycle coverage. The study further combines international experience with the current situation of China’s territorial spatial planning and constructs a general technical framework of “target-strategy-indicator” for adaptive urban green space planning in the context of carbon neutrality. In the face of the four levels of urban green space control: municipal administrative area -urban area-community-plot, the study proposes to differentiate the carbon neutral targets, specify the corresponding multi-scale precise efficiency planning strategies and multi-level assessment and control indicators, and actively promotes the application of three key technical systems: quantitative “carbon” accounting, multi-scenario “carbon” simulation and intelligent “carbon” monitoring, so as to provide professional support for the exploration of the adaptive transformation of urban green space planning practices.

Keywords

carbon neutrality; urban green space planning; adaptive planning; international experience; technical support

王 敏

1975年生 / 女 / 福建福州人 / 博士 / 系副主任、副教授、博士生导师 / Eco-SMART LAB联合创始人 / 研究方向为蓝绿空间生态系统服务、城市绿地与生态规划设计、韧性景观与城市可持续

宋昊洋

1998年生 / 女 / 河南平顶山人 / 在读硕士研究生 / 研究方向为风景园林规划设计

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: wmin@tongji.edu.cn

基金项目:
国家自然科学基金面上项目“基于多重价值协同的城市绿地空间格局优化机制: 以上海大都市圈为例”(编号: 52178053)

近年来, 气候变暖严重影响着全球城市生态安全, 极端天气如强降水、极端温度和强台风等频发^[1]。建立更加有效的气候治理体系、实现碳中和已成为各国城市建设的共识。截至2022年10月底, 已有139个国家/地区提出碳中和愿景, 并在城市区域展开相关减碳排、增碳汇行动^[2]。2020年9月, 国内正式提出“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”的目标承诺^[3], 推动城市空间碳源汇结构与布局向绿色低碳转型。

然而, 城市作为能源消费和碳排放的主要载体^[4], 相关研究和实践更多从碳源角度出发, 聚焦于能源、交通、建筑和工业等领域的直接减排途径^[5], 轻视了城市绿地在适应气候变化与促进社会低碳发展方面的重大潜力。已有研究指明, 城市绿地能有效维持碳平衡, 具有直接增碳汇、间接减碳排的双重生态效益^[6]。除了植被、土壤的固碳释氧功能^[7], 绿地系统的多层级空间属性与城市减碳紧密联系, 其改善人居环境微气候、促进居民绿色出行的生态效益也能间接减少碳排放^[8]。如今, 国内城市绿地规划尚以宏观指导性政策为主, 缺乏碳相关变量的量化评估及有效落实的行动策略^[9], 难以将减碳目标落实到具体的空间单元上。因此, 推动城市绿色低碳转型, 势必要从价值理性和工具理性的双重视角下进行碳中和目标导向下的城市绿地空间规划^[10]。这包含两层含义: 一方面, 在价值理性导向下识别城市绿地的碳中和需求, 寻求生态与生产、生活碳利益的平衡点, 综合生态本底、发展潜力、社会结构等因素差异化制定各类空间的适应性目标^[11]; 另一方面, 在工具理性的导向下重视科学理性的减碳逻辑, 面向城市绿地的规划建设运营全生命周期提出系统性、全局性的

时间	国家/城市	相关规划导则/实践	主要规划领域					规划实施框架			
			绿地建设	绿色交通	绿色建筑	清洁能源	产业发展	总体目标	规划策略	空间约束指标	实施评估反馈
2007	美国纽约	《更绿色、更美好的纽约》	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	美国芝加哥	《芝加哥气候行动计划: 我们的城市, 我们的未来》	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2008	澳大利亚悉尼	《永续发展的悉尼2030》	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	丹麦哥本哈根	《哥本哈根2025年环境规划》	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2009	中国台湾	《低碳社区构建手册》	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2010	加拿大温哥华	《最绿城市行动计划》	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2011	日本	《低碳城市建设规划编制手册》	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	日本	《低碳城市建设规划实践手册》	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	荷兰鹿特丹	《鹿特丹气候适应变化战略》	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2013	美国纽约	《一个强大和公正的纽约》	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	澳大利亚阿德莱德	《碳中和2016-2021行动计划》	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2015	法国巴黎	《法国国家低碳战略》	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	美国波士顿	《韧性波士顿》	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2016	法国巴黎	《巴黎大区能源与气候规划》	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	英国伦敦	《伦敦环境战略》	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	美国芝加哥	《芝加哥大都市区迈向2050区域综合规划》	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	芬兰赫尔辛基	《碳中和2035行动方案》	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	美国洛杉矶	《洛杉矶绿色新政——2019可持续发展城市规划》	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2018	美国纽约	《纽约2050建立强大且公平的纽约》	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	美国波士顿	《2019波士顿气候行动计划》	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	法国巴黎	《巴黎大区总体规划》	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	荷兰阿姆斯特丹	《气候中和2050路线图》	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	日本东京	《东京零碳排放战略》	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2019	德国弗莱堡	《弗莱堡远景规划2030》	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	新加坡	《新加坡绿色计划2030》	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2020	英国伦敦	《大伦敦规划2021》 《全生命周期碳评估导则》 《绿化评估导则》	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	中国香港	《香港气候行动蓝图2050》	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2021	中国台湾	《2050净零排放政策路径蓝图》	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2022			■	■	■	■	■	■	■	■	■

图1 碳中和目标下适应性规划的国际实践
Fig. 1 International practice of adaptive planning under carbon neutrality target

规划策略, 在最大化提升增碳汇、减碳排综合效益的同时, 实现动态化智慧监管。

基于此, 研究梳理了全球11个国家的30项相关规划行动, 从新加坡、美国、日本、加拿大温哥华、英国伦敦、法国巴黎、荷兰鹿特丹等国家和城市的绿地空间类规划实践中, 提炼总结其碳中和目标下规划体系、行动策略、技术方法等方面的经验, 并将进一步将国际经验与国内国土空间规划现状相结合, 构建国内城市绿地适应性规划的技术框架, 梳理对接相关前沿空间技术方法, 为探索提升国内城市绿地减排增汇效能的最优实践路径提供借鉴。

1 相关国际经验审视

如何将碳中和目标融入城市绿地适应性规划, 是目前国土空间规划面临的重要课题。许多发达国家和城市提出了相关计划及路线

图(图1), 将碳中和目标纳入各层级空间规划的编制、实施和监测等全过程, 推动绿地适应性规划有效助力城市碳中和。

1.1 多效益协同, 依托绿地系统规划推动城市绿色低碳发展

在将碳中和纳入城市发展目标时, 许多城市逐渐强调发挥城市绿地直接增碳汇、间接减碳排的生态效益, 并协同实现生态保护、民生改善、经济发展等多目标的共赢^[12]。有研究报告指出, 全球812个城市在建设低碳城市时, 将碳中和与气候适应、能源再生、废弃物管理和水安全等目标相结合, 协同提升城市多重生态效益。《新加坡绿色计划2030》面向净零排放的总体目标, 力求建设大自然中的城市, 在增加绿量的同时, 增加城市生物多样性, 减缓城市热岛, 将节能减排和环境保护作为一种可持续的生

活方式^[13]。温哥华《最绿城市行动计划》力图追求“一个城市可以发展、繁荣,同时也可以成为绿色之都”,从零碳、零废弃、健康生态系统三个维度提出对应的绿色行动,强调优化绿地空间的整体格局,提升环境、健康和能源方面的协同效益,促进城市绿色发展^[14]。美国旧金山提倡以基于自然的解决方案进行碳固存,在保护生态空间的同时,提升城市的韧性适应水平。《伦敦环境战略》推动绿色基础设施和自然生境的一体化建设,以建设零碳的绿色宜居城市^[15]。美国的“费城绿色城市计划”和新加坡的“ABC水计划”进行了基于绿色基础设施的雨洪管理实践,在提高城市雨水积存与蓄滞能力的同时,有效促进城市减排^[16]。

1.2 多层次传导,差异化构建“目标—策略—指标”的规划框架

面向碳中和目标,多层次空间规划作为重要的干预手段被纳入整体路线图,许多发达国家制定了一系列涉及国家、州和地方多尺度下的政策计划体系^[17],整合差异化的适应目标、措施和技术工具资源。法国巴黎进行基于碳中和目标的多层级规划修编,国家低碳战略纵向传导至大区、省级气候专项规划,横向传导至总体规划和详细规划层面^[18]。日本和美国纽约为城市低碳建设构建了“目标—策略—指标”的清晰内容框架,围绕路线图编制了空间结构和绿地领域的减碳规划,提出详细策略和约束指标^[19-20]。英国伦敦围绕零碳城市建设目标提出系列政策策略,并制定《绿化评估导则》作为补充规划导则,精细制定绿化环境领域的目标、政策和指标体系^[21]。荷兰鹿特丹将城市单元进一步细分为港口、Stadshavens地区、外堤城区、紧凑城市中心、内堤城区、战后地区和周边

地区6种类型,针对性提出相应的绿地适应性策略和措施^[22]。

1.3 全周期覆盖,数智技术赋能助力规划监测和动态修正

为在规划中准确、有效地减排增汇,各城市结合本土的碳排放结构,探索大数据、人工智能等新技术的应用,对规划实施效果及时进行评估反馈,推进精细化治理。日本充分利用交通普查、能源、林业等行业统计数据,建立规划策略与“减碳排、增碳汇”之间的逻辑关系,明确核算方法,实现对不同规划情景下碳减排效益的量化评估^[19]。美国为有效应对气候变化,积极合作开发预测模型,量化评估碳源汇并建立监测体系,如纽约基于不干预、弱干预、强干预3种预测情境的结果制定规划减碳路线图^[20],芝加哥则应用参数化模型模拟不同发展情景下的综合减排效益,动态优化城市格局^[23]。法国巴黎以三维GIS平台为依托,对具体地块和建设项目的碳数据进行精确监测,分析各类空间规划策略的实施效果^[24]。英国伦敦推出的《全生命周期碳评估导则》,要求评估场地各生命周期模块的碳排放量及相关减碳措施,同步开展年度动态监测并以报告形式考核评估,以及时精准反馈规划实施效果,优化实践方案^[25]。

1.4 经验启示

综上,城市绿地适应性规划应深度融合低碳、绿色、韧性等价值取向,推动绿地固碳增汇、降温减排及提升生物多样性等多重生态效益的协同增效,在碳中和目标下搭建“目标—策略—指标”的总体规划框架,明确规划总目标、分目标和主要行动策略,并提出关键的评估指标,确保多层次规划的稳步推进(图2)。同时,为充分发挥城市绿地

减碳增汇的生态功能,城市绿地适应性规划应积极探索新技术手段应用,建设碳汇碳排放评估及监测体系,并开展规划方案碳中和的多情境模拟与优化。

2 总体技术框架设想

碳中和目标导向下,空间规划是协同提升城市绿地减碳排、增碳汇生态效益的重要手段。基于上述国际经验启示,本研究在国土空间规划背景下,尝试探讨城市绿地适应性规划的实践逻辑,在相关技术手段的支撑下提出总体技术框架,明确目标建构、策略制定、指标管控等内容(图3)。

2.1 目标建构——差异化分区定标

面向国土空间规划“五级三类”的总体框架,推进城市绿地适应性规划应基于生态本底和发展需求,差异化制定不同层级和类型绿地规划建设的碳中和总体目标,兼顾生态环境与周边经济社会发展的动态协调。量化目标应与各区域自然条件、资源禀赋、发展阶段紧密相关,要基于现状能源、交通、建筑、交通和生态环境分析,量化分解碳源、碳汇的主要类型、影响因子及其与城市绿地空间特征的相关性分析,以进一步厘清关键规划影响因素,从增碳汇、减碳排两个维度分区进行量化核算,从而制定差异化的城市绿地碳中和总体目标,并根据后续实施反馈结果和方案自查情况,借助情景模拟及时对总体目标进行调整。

2.2 策略制定——多尺度精准增效

城市绿地作为多尺度嵌套的系统,要在“市域—城区—街区—地块”四级管控层级明确城市绿地增汇减排工作的主要内容,有效衔接相关规划管理的环节及技术手段。分解

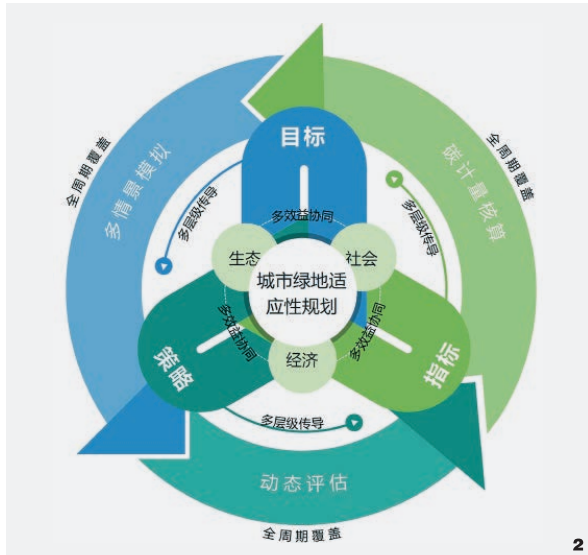


图2 城市绿地适应性规划的国际经验启示
Fig. 2 Insights from international experience in adaptive urban green space planning

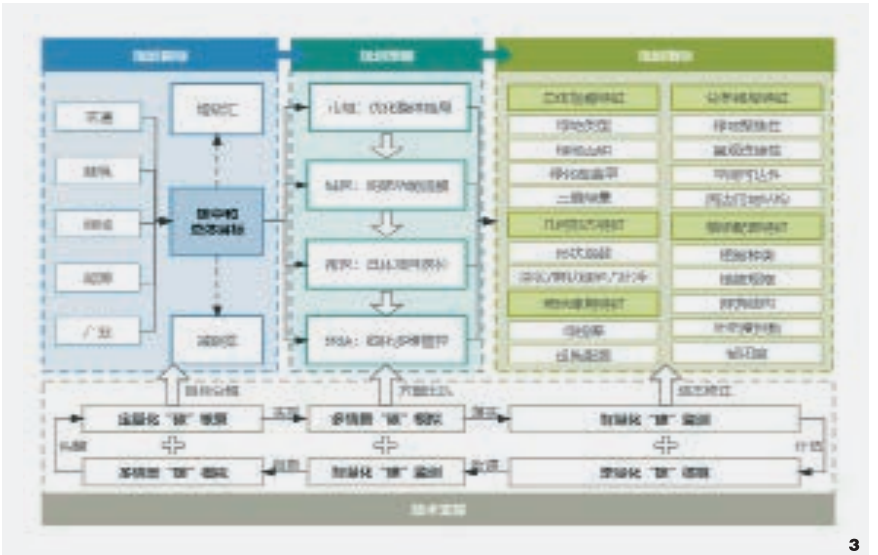


图3 城市绿地适应性规划的总体框架
Fig. 3 Overall framework of urban green space adaptability planning

碳中和目标后，结合城市绿地空间布局 and 结构特征，借助多情景模拟和动态监测技术，明确各空间层级城市绿地减排增汇工作的侧重点^[26]，实现多层次城市绿地系统减排增汇效能的精准增效。在市域层面，加强城绿空间整体低碳格局构建与优化，夯实城市及城市群的固碳基础；在城区层面，强调增加绿地空间的数量、质量和可达性，提升空间韧性；在街区层面，基于碳排碳汇空间模拟和监测，具体落位生态节点，探索低碳或零碳技术的空间应用路径；在地块层面则更精细地管控多维空间属性，推行相关低碳技术的试点示范。

2.3 指标管控——多层级评估监测

城市绿地的减排增汇效益受复杂城市环境影响。因此，城市绿地适应性规划应制定详细的空间约束指标，并基于碳中和指标评价对多层级规划建设方案进行碳中和效益的精准评估和动态监测，以支撑城市绿地适应

性规划的战略决策和持续优化。研究表明，总体规模特征、分布格局特征、几何形态特征、植物配置特征、场地使用特征均能影响城市绿地减排增汇效益的发挥^[9]。规划应建立相关空间指标体系，对接“五级三类”国土空间规划，为绿地空间类规划的落实提供量化考核支撑。同时，面向碳中和目标，借助数字化和人工智能技术建设动态的监测体系，评估规划实施结果，基于碳效益核算结果及时反馈其与规划目标的偏离程度，以便实现对规划目标、策略和指标等的动态循环修正。

3 前沿技术支撑

基于上文可知，碳中和背景下的绿地系统规划的转型需要技术赋能，依托多源数据和数字平台建设，积极运用大数据、人工智能等技术，推进碳的量化核算、多情景模拟、智慧化监测，以大幅提高城市绿地适应性规划编制的科学性和规划实施的实效性，推动规划决策的动态循环优化。

3.1 量化“碳”核算

随着多源数据的应用，以土地调查数据、行业统计数据为测算基础的碳排放、碳汇测算，为制定城市绿地适应性规划目标，实现碳全生命周期管控提供坚实依据。

碳汇方面，绿地具有多尺度耦合的特征，现有研究多进行样地调查法、同化量法、微气象法和遥感估算法等方法的综合运用^[27]。面向大范围的城市绿地系统，遥感估算法具有实时、快速获取数据的优势。研究可将遥感影像和实测数据、数学模型结合，建立植物固碳量及其生物学因素的拟合方程，在时空层面直观呈现城市绿地的碳汇功能。杨鑫等人从街区层面开展研究，基于高清卫星遥感影像反演推导，结合数学估算获得北京中心城区碳储量数值^[28]。殷炜达通过回归分析构建了4类绿地NDVI与碳储量的拟合模型，对不同类型绿地碳汇能力进行量化比较^[29]。

碳排方面，当前国际上较成熟的核算模型有IPCC模型、WRI分析模型、GPC模型、

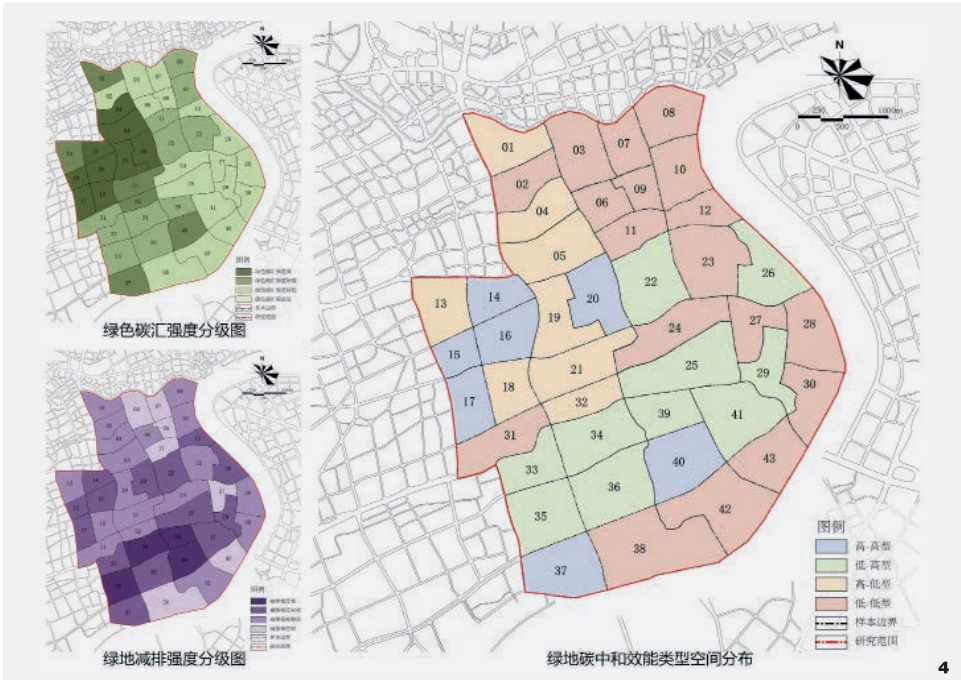


图4 上海市黄浦区城市绿地的碳中和效益评价(图片源自参考文献[6])
Fig. 4 Evaluation of the carbon neutrality benefits of green spaces in Huangpu District, Shanghai

LEAP模型、Kaya模型等,其中IPCC模型较为权威^[5]。该模型将碳排放分为4大类部门:能源、工业、农/林业及土地利用和废弃物管理。目前,有相关研究从城市消费端的角度归纳,将碳排放进一步细化,基于排放清单及多源数据,实现与空间类规划体系多尺度衔接^[5]。王雅捷等人将用地因素纳入碳排放清单框架,实现碳排放—规划要素—终端活动的关联^[30];扈万泰等人则针对街区空间布局,关注到微气候对碳排放的影响^[31]。

综上,在多尺度空间单元下进行量化“碳”核算,要结合年鉴类统计数据、遥感图像、数字模拟、现场调研结果等多源数据,对城市空间的各维度碳汇、碳排放量进行细致分析和综合评估,定量明确碳结构,推进差异化规划策略。研究以上海市黄浦区为实例,综合运用模型计算、地表温度反演等技术,全面量化评价城市绿地的碳中和效益(图4),

在空间特征视角提出绿地碳中和增效策略与方法,对量化碳中和效益进行一定探索^[6]。

3.2 多情景“碳”模拟

城市绿地适应性规划要充分考虑复杂空间发展情景下的碳中和效益及演化机制,对规划方向做出综合研判。“碳”模拟应通过多目标—多情景的规划场景模拟,对不同规划策略减排增汇的贡献率、成本效益和对社会、经济等维度的正负面影响进行模拟预测,有效支撑规划决策和项目优选。

目前,可通过长时序、多样本的历史碳数据,模拟未来可能的碳排、碳汇水平,预测不同发展方案的绿地碳中和效益^[11]。“碳”模拟大多从自上而下视角出发,对不同空间单元的社会经济、土地利用与碳排放之间的数学耦合关系做出模拟预测,从而辅助碳排、碳汇的总量控制。许多研究通过

预测绿地格局的演变动态进行碳模拟,如中性模型^[32]、CA-Markov模型^[33]、CLUE-S模型^[34]等。综合考虑自然环境、交通区位和社会经济等因子及不同土地利用类型间的相互作用,庄子薛等人以未来土地利用模拟FLUS(Future Land Use Simulation)模型开展优化研究,有效耦合人类活动和自然环境因素的影响,模拟出较高精度的未来土地利用分布^[35]。同时,也有研究从自下而上视角出发,对微观尺度的场地、社区单元等的碳汇碳排进行模拟,反推汇总得到大尺度的碳中和效益。例如,人工智能技术驱动的空间形态生成(urban fabric generation)可基于对已有城市绿地案例的学习,建立多维度要素(如地形、路网、建筑)间的组合关联,生成空间设计方案^[36],从而计算碳中和效益。

实现多情景“碳”模拟,可以将自上而下和自下而上两类方法进行有机叠加,将目标在多层级整合分解,增强规划落地性,提升治理精准性。此外,需要注意的是,情景预测需要大量的数据积累,可结合智慧化“碳”监测平台的建设,实时采集碳数据并反馈到模型中进行修正,形成双向正反馈机制,让预测模型更好地支持规划决策。

3.3 智慧化“碳”监测

碳评估要面向规划治理目标,评估规划实施结果与碳中和目标的偏离程度,以便及时反馈和纠偏。在国土空间背景下,城市系统模型与人工智能技术的应用,能有效助力空间规划的成果质检和管理,做到直观可视、有“数”可依^[23]。吴志强以City CQ(City Carbon Quotient)评价城市双碳情况,利用多源数据量化统计城市绿地乔木覆盖率、混合植物覆盖率、灌木覆盖率、生态空间配比及地均碳汇能力的指标,实现城市绿地碳中和效益的数

字化、可视化实时追踪^[37]；郑德高等人在减碳单元提出建立智慧管治支撑系统，形成全过程设计、收集、监控与运营的平台，支撑适应性规划策略的实践和反馈，应用互联网、物联网、云计算、大数据、人工智能等技术组成集合数据层和协同层的智慧管控体系^[5]。

总的来说，城市绿地适应性规划是一个多维度、多层次、全过程的复杂规划技术体系，统筹规划科学有序进行，需要“数”“智”技术体系的有力支撑，实现对城市空间的有效组织和监管。绿地适应性规划应融入城市信息模型平台，利用集成大数据进行多维动态评估和可视化管理，摸清和优化城市碳排、碳汇结构及其空间耦合机制，助力探索城市绿色低碳发展的最优路径。

4 结语

城市绿地具有直接增碳汇、间接减碳排的双重生态效益，是实现碳中和的基于自然的重要解决方案。在国土空间规划背景下，城市绿地适应性规划作为实现碳中和的重要空间治理工具，应向多效益协同、多层次传导、全周期覆盖转型，综合平衡生态、经济等多种效益，在市域、城区、街区和地块层级下联动编制、实施、监测等环节，为城市绿色低碳转型提供专业支撑。同时，数字化、人工智能和多源数据应用的兴起为空间规划带来了理论探索与方法革新的机遇，为理解复杂碳排碳汇机制、提出空间对策提供综合性的科学视角。后续研究将进一步在多领域联动的视角下，深入探索不同类型、不同发展阶段的城市绿地空间单元实现“双碳”目标的差异化治理路径，针对性分类构建技术工具包体系，以精准高效提升绿地生态效益的协同效应，并结合具体实践，推动建设具有地方特色的城市绿地适应性规划实践样本。

参考文献

[1] IPCC. Global Warming of 1.5°C[R/OL]. 2018[2022-10-15]. <https://www.ipcc.ch/sr15>

[2] ECIU. Energy&Climate Intelligence Unit.Net zero tracker[EB/OL]. 2022[2022-10-28]. <https://zerotracker.net>.

[3] 中华人民共和国中央人民政府. 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话[EB/OL]. (2020-09-22) [2022-10-15]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content_5546168.htm

[4] 鲁钰雯, 翟国方. “双碳”目标下低碳韧性城市建设的国际经验及启示[J]. 科技导报, 2022, 40(6): 56-66.

[5] 郑德高, 吴浩, 林辰辉, 等. 基于碳核算的城市减碳单元构建与规划技术集成研究[J]. 城市规划学刊, 2021(4): 43-50.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 陈可欣, 陶韦华, 方晓丽, 等. 国土空间规划中碳中和评估及规划应用路径研究[J]. 规划师, 2022, 38(5): 134-141.

[10] 王敏, 叶沁妍, 托马斯·赫尔德. 行为主体互动下的水系空间管理与生态服务优化：基于德国埃姆舍河发展演变的实证研究[J]. 风景园林, 2017(1): 52-59.

[11] 李智轩, 甄峰. 双碳目标下城乡空间治理路径与策略[J]. 城市发展研究, 2022, 29(5): 113-118.

[12] 石晓冬, 赵丹, 曹祺文. “双碳”目标下国土空间规划响应路径[J]. 科技导报, 2022, 40(6): 20-29.

[13] Singapore Green Plan 2030[EB/OL]. 2021[2022-10-15]. <https://www.greenplan.gov.sg/>

[14] Vancouver Council. Greenest City 2020 Action Plan[R/OL]. 2011[2022-10-15]. <https://vancouver.ca/files/cov/Greenest-city-action-plan.pdf>

[15] London City Hall. London Environment Strategy[R/OL]. 2021[2022-10-15]. https://www.london.gov.uk/sites/default/files/report_to_the_mayor.pdf

[16] 陈天扬. “碳中和”导向下的城市设计初探——以马来西亚森林城市为例[J]. 世界建筑导报, 2022, 37(4): 52-55.

[17] 冷红, 李妹媛. 应对气候变化健康风险的适应性规划国际经验与启示[J]. 国际城市规划, 2021, 36(5): 23-30.

[18] 熊健, 卢柯, 姜紫莹, 等. “碳达峰、碳中和”目标下国土空间规划编制研究与思考[J]. 城市规划学刊, 2021(4): 74-80.

[19] 姜紫莹. 日本低碳城市建设规划中的减碳逻辑与碳定量方法[J]. 国际城市规划, 2022(04): 1-12.

[20] City of New York. One NYC 2050: New York City’s

Strategic Plan[EB/OL]. 2019[2022-10-15]. <https://onenyc.cityofnewyork.us>

[21] London City Hall. Urban Greening Factor (UGF) Guidance[EB/OL]. 2021[2022-10-15]. <https://www.london.gov.uk/publications/urban-greening-factor>

[22] Rotterdam Adaptation Strategy[EB/OL]. 2013[2022-10-15]. <https://www.urbanisten.nl/work/rotterdam-adaptation-strategy>

[23] 潘浩之, 施睿, 杨天人. 人工智能在城市碳达峰、碳中和规划与治理中的应用[J/OL]. 国际城市规划: 1-23[2022-11-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5583.TU.20220822.1431.001.html>.

[24] Île-de-France. Île-de-France 2030[EB/OL]. [2022-10-15]. <https://www.iledefrance.fr/sdrif-construire-lile-de-france-de-2030>

[25] London City Hall. Whole life-cycle Carbon Assessments Guidance[R/OL]. 2021[2022-10-15]. https://www.london.gov.uk/sites/default/files/lpg_-_wlca_guidance.pdf

[26] 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.

[27] 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.

[28] 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.

[29] 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.

[30] 王雅捷, 何永. 基于碳排放清单编制的低碳城市规划技术方法研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(6): 72-80.

[31] 扈万泰, Calthorpe Peter. 重庆悦来生态城模式——低碳城市规划理论与实践探索[J]. 城市规划学刊, 2012(2): 73-81.

[32] 伍海峰, 李月辉, 李娜娜. 中性景观模型在景观生态学中的应用和发展[J]. 生态学杂志, 2012, 31(12): 3241-3246.

[33] 褚琳, 张欣然, 王天巍, 等. 基于CA-Markov和InVEST模型的城市景观格局与生境质量时空演变及预测[J]. 应用生态学报, 2018, 29(12): 4106-4118.

[34] 韩会然, 杨成凤, 宋金平. 北京市土地利用空间格局演化模拟及预测[J]. 地理科学进展, 2015, 34(8): 976-986.

[35] 庄子薛, 谢梦晴, 张文萍, 等. 基于FLUS-InVEST模型的碳储量时空变迁及多情景模拟预测——以成德眉资地区为例[J]. 风景园林, 2022, 29(5): 38-44.

[36] 杨天人, 金鹰, 方舟. 多源数据背景下的城市规划与设计决策——城市系统模型与人工智能技术应用[J]. 国际城市规划, 2021, 36(2): 1-6.

[37] WUPEN. Digital Tracking of Carbon Neutrality[EB/OL]. 2022[2022-10-15]. <http://wupen.org/lectures/198>