

# 双碳目标下城市空间碳固存与增汇路径研究

石铁矛<sup>1</sup>,高 杨<sup>2</sup>,王 迪<sup>2</sup>

(1. 沈阳建筑大学空间规划与设计研究院,辽宁 沈阳 110168;

2. 沈阳建筑大学建筑与规划学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘 要** 目的 以城市空间碳增汇为目标,探索城市复合碳汇空间综合固碳机制,提出相应的空间优化方法,构建低碳城市空间规划方法体系。方法 依托多源数据,构建城市碳源碳汇时空数据库,运用熵权-TOPSIS模型,对当前城市空间固碳效能进行评价,揭示城市复合碳汇空间固碳效能格局;运用耦合协调模型结合回归分析,识别人工-自然碳汇空间固碳效能耦合协调关键空间驱动因子,探明城市复合碳汇空间固碳效能空间影响机制;利用OLS-GWR模型,明确各环境因素影响程度的空间差异,探明城市复合碳汇空间固碳效能环境影响机制。结果 最终根据机制研究结果,探讨增汇目标下的多尺度空间优化方法,从而引导城市空间的合理布局。结论 研究能够形成空间评价-机制研究-空间优化的系统规划方法,为城市低碳发展和碳中和目标的实现提供科学依据。

**关键词** 碳汇;固碳机制;低碳规划;城市空间;碳中和

中图分类号 TU 984.199;X171.1

文献标志码 A

**引用格式:**石铁矛,高杨,王迪.双碳目标下城市空间碳固存与增汇路径研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(2):193-202.(SHI Tiemao,GAO Yang,WANG Di. Research on the path of carbon fixation and carbon sink in urban space under dual carbon target [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024,40(2):193-202.)

## Research on the Path of Carbon Fixation and Carbon Sink in Urban Space under Dual Carbon Target

SHI Tiemao<sup>1</sup>,GAO Yang<sup>2</sup>,WANG Di<sup>2</sup>

(1. Institute of Spatial Planning and Design, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Architecture and Planning, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** Exploring the comprehensive carbon sequestration mechanism of urban composite carbon sinks with the goal of increasing carbon sequestration in urban space, proposing corresponding spatial optimization methods, and constructing a low-carbon urban spatial planning method system. The method relies on multi-source data to construct a spatiotemporal database of urban carbon

收稿日期:2023-07-25

基金项目:国家自然科学基金项目(52378063)

作者简介:石铁矛(1957—),男,教授,博士研究生导师,主要从事生态城市与城市碳中和等方面研究。

sources and carbon sinks. The entropy weight TOPSIS model is used to evaluate the current urban spatial carbon sequestration efficiency and reveal the pattern of urban composite carbon sink spatial carbon sequestration efficiency; Using a coupling coordination model combined with regression analysis, identify the key spatial driving factors for the coupling coordination of carbon sequestration efficiency between artificial and natural carbon sinks, and explore the spatial impact mechanism of carbon sequestration efficiency in urban composite carbon sinks; Using the OLS-GWR model, clarify the spatial differences in the degree of influence of various environmental factors, and explore the environmental impact mechanism of carbon sequestration efficiency in urban composite carbon sinks. Based on the research results of the mechanism, the multi-scale spatial optimization methods under the goal of increasing sinks were explored to guide the rational layout of urban space. Research can form a systematic planning method of spatial evaluation mechanism research spatial optimization, providing scientific basis for the achievement of urban low-carbon development and carbon neutrality goals.

**Key words:** carbon sink; carbon sequestration mechanism; low carbon planning; urban space; carbon neutrality

近百年来,人类活动产生的碳排放对全球气候变暖的影响导致了一系列气候事件灾害。现阶段,全球人类碳排放量约 $(9.9 \pm 0.5) \times 10^9$  t/a,我国作为第一大碳排放国,碳排放量占总排放量的31%<sup>[1]</sup>。习近平总书记在第七十五届联合国大会上指出:中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,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。这是我国积极应对气候变化的国策,也是中国基于推动构建人类命运共同体的责任担当。发达国家用了60~70 a的时间实现碳排放达峰,而我国将这一时间缩短到30 a,这使得实施“3060战略”成为一项紧迫、复杂和艰巨的任务<sup>[2]</sup>。实现碳中和的路径总体上可分为碳减排和碳增汇两种方式<sup>[3]</sup>。陆地生态系统碳增汇是当前国际社会公认的经济可行且环境友好的减缓大气二氧化碳浓度升高的重要途径之一,是实现碳中和的重要路径。

城市是一切经济社会活动的主要载体,通常被认定为区域的主要碳源。2022年,中国城镇化率已达65.22%,城市用地的扩张和密集的碳排放,使城市的运行对气候及环境影响愈加严重。低碳城市的建设使得城市碳汇成为了减缓气候变化的重要组成部分。研究表

明,城市中自然生态系统与人工建设系统都具有固碳功能,我国城市绿地面积及其碳储量呈现逐年增长的趋势,根据CEADs中国碳核算数据库的数据显示<sup>[4]</sup>,2017年全国市辖区植被碳汇量为 $1.19 \times 10^7$  t,占总碳汇量的10.13%,城市绿地面积达到292.13万 $\text{hm}^2$ ,2020年城市绿地面积达到331.22万 $\text{hm}^2$ ,同比增长率为5.05%。与此同时,1930—2016年,我国水泥混凝土建筑碳汇累计达 $2.76 \times 10^7$  t;1963—2016年,我国废弃物累计碳汇 $1.5 \times 10^6$  t。城市自然生态系统与人工建设系统构成了城市的碳库,尽管与其他陆地生态系统类型相比,城市碳汇系统碳储量相对较小,但绝对量还是巨大的,使得城市碳汇系统在抵消碳排放和改善地方气候方面具有重要的作用<sup>[5]</sup>,不仅影响着城市碳收支,也是全球碳循环不可缺少的环节。在实现碳中和目标的迫切需求下,如何通过增强城市空间的碳固存和碳增汇能力,缓解减排压力成为了迫切需要解决的问题,碳增汇也成了当前城市发展过程中的重要需求。

## 1 城市空间碳固存的构成

目前国内外对碳固存的研究主要集中于森林、草地等其他陆地生态系统,很少涉及城

市自然生态系统和人工建设系统,城市碳固存系统的整体固碳功能未得到充分的重视。城市碳固存系统是自然生态碳固存系统与人工建设碳固存系统组成的有机整体,城市碳固存系统内自然与人工碳固存要素所构成的三维空间形成了自然碳固存空间与人工碳固存空间,二者共同构成了城市复合碳固存空间(见图1)。自然碳固存空间和人工碳固存空间相对独立又相互影响。对城市碳汇系统的研究还刚起步,城市复合碳汇空间的固碳效能还未形成系统的计算方法,固碳机制也亟待探明,如何通过规划手段实现城市空间碳增汇还存在理论与技术的瓶颈。

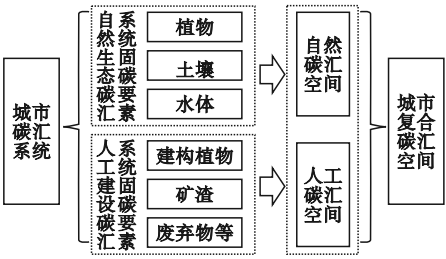


图1 城市空间碳固存构成

Fig. 1 Composition of carbon sequestration in urban space

2 城市空间碳固存研究进展

城市自然碳汇空间主要包括植被、土壤和水体三种碳汇要素<sup>[6]</sup>。在城市空间内,自然碳汇要素受到人为活动及其衍生的环境扰动影响,固碳能力的影响因素也更加复杂。目前,国内外对于以上三种碳汇要素效能估算以及影响因素的研究成果丰富,但相比之下,对多种碳汇要素的综合研究较少。

人工碳汇的研究源起于“碳失汇”问题,城市人工空间中混凝土建筑和构筑物、矿渣、工业废弃物等具有一定的固碳功能,构成了城市人工碳汇空间。现阶段,对这一部分内容的研究较少。

2.1 城市自然系统碳固存研究进展

城市绿地固碳功能对城市碳中和起着重

要作用。目前,对于城市植被碳汇的量化研究主要体现于两个方面:一是对城市绿地几种植物的固碳释氧效能及价值进行量化分析<sup>[7]</sup>;二是对城市绿地固碳能力的效益及价值进行整体的分析与评价<sup>[8]</sup>。植株尺度的研究发现,影响城市植被固碳效能的主要因素包括植株的种类、年龄、叶位等自身因素以及二氧化碳浓度、温度、日照、降水以及大气污染等环境因素<sup>[9]</sup>。城市尺度上,城市绿地固碳能力影响因素主要包括:绿地面积、种植密度、群落结构、绿地类型、网络连通性等绿地自身因素;当地气候、土壤类型等环境因素;土地利用变化、建筑密度、绿地管理等人为因素;收入水平、居民认知等社会经济因素<sup>[10-12]</sup>。植被固碳能力的量化方法主要包括生物量法<sup>[13]</sup>、积蓄量法<sup>[14-15]</sup>、生物清单法<sup>[16]</sup>和箱式法<sup>[17]</sup>。

在土壤碳汇研究方面,城市土壤固碳能力的影响因素可以归结为4类:土壤自身因素、地上覆盖因素、城市环境因素和人为活动因素<sup>[18-20]</sup>。土壤自身因素包括土壤质地、土层深度、土壤生物量等;地上覆盖因素包括绿地植被组成与类型、土地利用变化等;城市环境因素包括大气环境、城市微气候、土壤污染等;人为活动因素包括人群踩踏、开发建设时间等。土壤固碳能力的估算方法主要有:土壤类型法、生命带法、遥感技术估算法、模型法、相关关系估算法<sup>[21]</sup>,其中以土壤类型法和生命带法最有代表性。笔者及其学术团队<sup>[22]</sup>分析了城市土壤的有机碳含量及其空间分布,结果表明,沈阳市三环内绿地有机碳(SOC)储量为 $6.438 \times 10^5$  t,碳密度为 $3.98 \text{ kg/m}^2$ 。不同土地利用类型碳密度最高的是工业用地,最低的是居住用地。该结果与乌鲁木齐市<sup>[23]</sup>、石嘴山市<sup>[24]</sup>研究结果相近,与南京市<sup>[25]</sup>有一定差异。

城市水系的有机碳来源包括内源和外源,外源主要为汇入水体地表径流所带来的土壤及植物有机质以及人类生产生活活动排放的污染物<sup>[26]</sup>,而内源主要为水生植物与微

生物等<sup>[27]</sup>。水生植物与沉积物量化方法与植被、土壤碳汇能力量化方法相同。影响水系碳汇因素的研究包括水生植物、水体有机碳和沉积物有机碳3个方面。水生植物固碳能力的影响因素主要包括:群落类型、环境因素、水文条件等<sup>[28]</sup>。影响水体有机碳浓度的因素包括:水文条件、氮磷浓度、污染物浓度、浮游生物数量等<sup>[29]</sup>。沉积物固碳能力的影响因素包括:水体污染、pH、水生植物群落类型等<sup>[30-31]</sup>。一般认为水体中的有机碳是城市河流中有机污染物的重要载体<sup>[32]</sup>。因此多数研究认为对城市水系中的有机碳含量需要进行控制<sup>[33]</sup>。

## 2.2 城市人工空间碳固存研究进展

随着全球碳循环研究不断深入,有学者发现水泥、矿物、钢渣、石灰等能够不断吸收环境中的 $\text{CO}_2$ <sup>[34]</sup>,城市中这些无机材料构成了人工空间的重要组成部分。例如城市建筑主体的水泥混凝土,用于建筑抹灰、砌筑及装饰修补的石灰砂浆、提高建筑材料密实度、抗渗性、耐水性的水玻璃等。这些人工要素所包含碱性氧化物,在与空气中的 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 碳化过程中可以吸收二氧化碳,形成稳定的物质<sup>[35]</sup>。有研究表明,城市人工碳汇二氧化碳吸收量逐年累积,总碳封存量相当可观<sup>[36]</sup>,因此城市人工碳汇空间的固碳能力不应被忽视。量化城市人工碳汇的固碳总量,对科学评估城市空间在碳中和中的作用、实现城市碳中和目标具有重要价值。

关于城市人工碳汇的研究,国内外研究均刚刚起步,大部分都局限在材料本身<sup>[37]</sup>,城市空间尺度研究较为少见。有学者从建筑生命周期角度,通过对城市建筑中混凝土使用阶段碳化、建筑拆除阶段碳化、建筑垃圾处理 and 再循环阶段碳化等方面核算碳汇量,初步建立了城市建筑混凝土核算方法<sup>[38]</sup>。1930—2013年,全球范围内水泥材料的碳汇量累计达 $4.5 \times 10^9$  t,相当于同期生产水泥二氧化碳排放量的43%<sup>[39]</sup>;美国波特兰水

泥协会估算了美国2000年新建筑物在建成后一年内的固碳量,约为 $2.0 \times 10^5$  t<sup>[40]</sup>;北欧学者估算了丹麦、挪威、冰岛<sup>[41]</sup>和瑞典<sup>[42]</sup>混凝土建筑物在100 a生命周期内的碳固存量,分别为 $3.4 \times 10^5$  t、 $2.2 \times 10^5$  t、 $2.1 \times 10^4$  t和 $3.0 \times 10^5$  t。刘丽丽等<sup>[43]</sup>估算了我国1963年钢渣固碳量为 $3.75 \times 10^3$  t,到2016年则增长为 $1.36 \times 10^6$  t。笔者研究团队在梳理国内外人工碳汇研究的发展历史的基础上<sup>[44]</sup>,构建了从材料试块<sup>[45]</sup>—建筑、构筑物单体—区域尺度<sup>[46]</sup>—城市尺度<sup>[47]</sup>—整套人工碳汇核算方法。运用这套方法核算了沈阳市沈北新区蒲河新城1996—2016年总建筑碳汇量为 $3.82 \times 10^5$  t,沈阳市三环内建筑碳储量为 $2.17 \times 10^6$  t。

我国矿产行业开采活动和高碳工艺流程排放了大量的温室气体<sup>[48-49]</sup>。一方面,矿产开采活动对矿区土壤和植被产生强烈扰动,土壤破坏和植被移除使矿山生态系统丧失固碳能力;另一方面,矿产剥离、开采、分/洗选、球团、炼钢、运输、排弃等工艺过程中会排放大量温室气体,包括工艺过程中机械设备能源消耗和开采过程中瓦斯等气体溢散造成的碳排放。

传统的矿山生态环境修复包括地质地貌重塑、植被修复、土壤基质修复3个方面<sup>[50]</sup>。地质地貌重塑主要涉及回填整平、坡面加固排危、土方疏通、人工设施、生物装置、物理工程等;植被修复包括植物搭配和植被营造;土壤基质修复包括物理修复、化学修复和生物修复。矿山生态环境修复的碳效应主要集中在矿区土地利用覆被变化带来的碳增汇,修复后的矿山生态系统可以达到自然土壤和植被的碳密度,分别为 $51.60 \sim 53.75$  t/hm<sup>2</sup>和 $6.24 \sim 9.95$  t/hm<sup>2</sup><sup>[51]</sup>。刘鹤云<sup>[52]</sup>对山西省平朔矿区2009—2013年期间的碳减排能力进行了评估,通过绿色植被恢复,矿区温室气体减排量在15.33~16.99万t。张黎明等<sup>[53]</sup>对安徽省淮北矿区复垦碳减排进行了



测算,对 1.05 万  $\text{hm}^2$  损毁土地进行复垦后,二氧化碳年吸收量可增加 16.80 万 t。

### 2.3 研究评述

从文献综述可以看出,城市自然碳汇空间研究成果比较丰富,人工碳汇空间研究起步虽然较晚,但随着研究的深入,相关学者逐渐认识到人工系统碳汇的巨大潜力,这些成果能够较好地支撑本研究。但是由于城市自然碳汇空间研究技术方法主要沿用陆地生态系统碳汇研究的技术方法,人工碳汇空间研究主要集中在碳汇量的计算上,因此相关研究存在以下几个问题:

(1)城市自然碳汇空间主要集中于某一类碳汇要素的计算与影响因素,自然碳汇空间内各项碳汇要素的综合研究不足;

(2)从全球尺度的研究来看,自然碳汇空间内各类碳汇要素间的关系存在不确定性,但单纯的生态系统模型无法重现这种不确定性;

(3)人工碳汇空间固碳能力核算尚缺少公认的核算方法;

(4)城市人工碳汇空间与自然碳汇空间之间互相独立,但在空间占位与固碳效应上又互相影响,当前二者之间缺少复合研究;

(5)对于城市碳汇空间固碳效能影响的研究往往采用全局统计分析模型,但城市空间相较其他陆地生态系统类型更加复杂,全局分析模型不能很好地描述城市空间内固碳效能与城市环境因空间不同而产生的相关影响因素变化。

## 3 城市空间碳汇研究的关键问题

当前亟需开展城市空间碳固存及路径研究,从城市综合碳汇的角度去研究城市固碳机制,明确影响城市综合碳汇固碳效能的关键因素,探明人工碳汇与自然碳汇空间的耦合关系,找到实现固碳效能提升的最优化的人工-自然空间配置,改善城市碳汇系统结构与质量,突破城市碳增汇的技术瓶颈,助力

城市碳中和目标的实现。

城市自然空间与人工空间往往呈现此消彼长的规律,在城市发展中一般体现为城市人工空间对城市自然空间的侵占。随着城市化进程的加快,土地利用类型的变化导致城市硬化地表不断挤占透水表面,使得城市自然空间的占比不断下降、破碎化程度逐渐加大,城市中大气、水、土壤环境也随之改变,干扰了自然空间的生态过程,严重影响了自然空间生态功能的有效发挥,进而从空间和功能两方面影响土壤、植被和水系的固碳效能。除了人工与自然空间动态变化导致固碳效能受到影响外,碳汇空间自身的质量也决定了其吸纳碳排放的能力,在这种情况下,为实现城市空间碳增汇,就要解决以下问题:

(1)如何量化分析城市复合碳汇空间的碳汇过程、总体格局与固碳效能;

(2)如何探明城市人工空间与自然空间的耦合机理及其对城市复合碳汇空间综合固碳效能的影响,促进城市人工碳汇与自然碳汇的协调发展,实现城市碳汇系统结构的改善;

(3)如何准确识别城市复合碳汇空间固碳效能的关键环境因素,实现城市碳汇系统质量的提升。

## 4 城市空间增汇路径方法研究

首先根据卫星遥感、样地调查等数据构建城市碳源碳汇信息数据库及城市环境信息数据库,核算城市综合固碳效能,分析碳源碳汇三维时空格局分布,利用熵权 TOPSIS 分析明确当前城市复合碳汇空间固碳效能分布情况,揭示城市复合碳汇空间固碳效能时空差异;其次,对人工与自然碳汇空间的固碳效能耦合协调性进行评价,通过回归分析找到促进或抑制两者协调的空间影响因素,明晰空间因素对城市复合碳汇空间固碳效能的影响机制,探索更优化的城市自然与人工碳汇空间布局模式;再次,梳理总结影响城市人工碳汇与自然碳汇效

能的大气环境、水环境、土壤环境等因素,通过 OLS-GWR 分析,构建城市复合碳汇空间固碳效能环境影响模型,明确城市复合碳汇空间固碳效能的环境影响机制;最后,根据以上研究结果,从城区、片区、单元三个尺度提出碳增汇目标下的城市空间优化方法。

4.1 碳源碳汇三维时空格局与城市空间固碳效能时空差异

结合长期数据监测、二氧化碳通量与浓度观测、遥感监测等技术手段,对多源碳源碳汇信息数据进行计算与分析,构建基于复合碳汇空间的城市综合固碳效能核算方法,探明城市空间内碳汇的现存量和固碳能力。依托 ArcGIS 平台,利用空间分配等技术手段,以城市主干道 800 ~ 1 200 m 为区间划分街区单元,绘制统一底图,非建设用地空间尽可能按照道路、桥梁划定,以此为基础绘制城市碳源碳汇三维空间地图,构建城市碳源碳汇三维时空数据库,分析城市空间的碳源碳汇演变情况,并通过熵权 TOPSIS 分析揭示城市复合碳汇空间固碳效能分布情况(见图 2)。

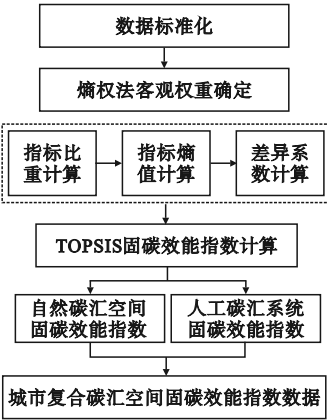


图 2 城市复合碳汇空间固碳效能评价研究路线

Fig. 2 Roadmap for evaluating the carbon fixation efficiency of urban composite carbon sink space

4.2 基于人工与自然耦合协调的固碳效能空间影响机制

解决城市人工与自然碳汇空间矛盾对城市复合碳汇空间固碳效能的影响,从人工与自然碳汇系统之间的耦合协调性入手,探索

不同人工与自然碳汇空间组合形式对城市复合碳汇空间固碳效能的影响,揭示实现高效能复合碳汇空间的关键驱动机制。采用耦合度、综合得分、耦合协调度作为城市人工与自然碳汇空间固碳效能耦合关系的评价因子。从城区和街区单元两个尺度进行耦合协调评价,通过评价与城市和街区的空间形态与结构因素进行多元回归分析,确定驱动人工碳汇与自然碳汇协调发展的关键空间要素,通过形态与结构的调控,实现基于固碳效能提升的人工 - 自然碳汇空间配置最优解,研究路线如图 3 所示。

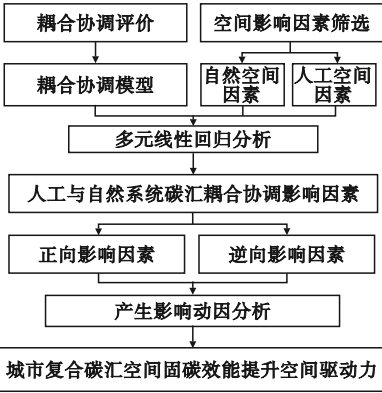


图 3 城市复合碳汇固碳效能空间影响机制研究路线

Fig. 3 Roadmap for research on spatial impact mechanism of carbon fixation efficiency of urban composite carbon sinks

4.3 基于土 - 水 - 气复合的固碳效能环境影响机制

分析历史观测数据,研究城市环境对碳汇空间固碳效能的影响机制,厘清城市环境变化对城市复合碳汇空间固碳效能的影响。选择城市土壤环境影响因素、城市水环境影响因素和城市大气环境影响因素作为影响固碳效能的潜在因素,运用最小二乘线性(OLS)回归结合地理加权回归(GWR)分析,构建环境 - 固碳效能影响模型,识别调控固碳效能的关键环境因素,为城市复合碳汇空间的优化提供依据,研究路线如图 4 所示。

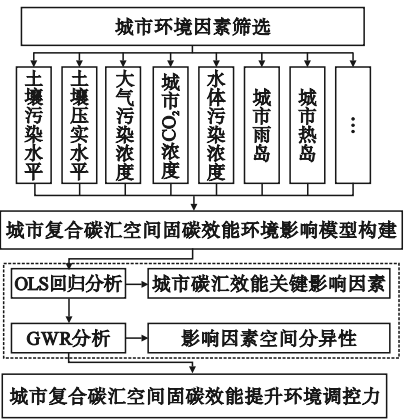


图4 城市复合碳汇固碳效能环境影响机制研究路线

Fig.4 Roadmap for research on environmental impact mechanism of carbon sequestration efficiency of urban composite carbon sinks

4.4 碳增汇目标下城市空间优化方法

在掌握城市复合碳汇空间固碳效能格局、空间影响机制及环境影响机制的基础上，从城区、片区、街区单元三个尺度分别提出碳增汇目标下空间优化策略，并总结出城市空间优化方法。具体研究内容包括：

(1)城区尺度空间优化策略。根据整体城市碳源汇格局情况，判定是否存在城市主要碳排放空间(包括主要直接碳源分布与主要二氧化碳分布空间)与主要碳汇空间错位

情况,提出城区碳汇空间布局与碳汇廊道的优化策略。

(2)片区尺度空间优化策略。城市主要功能区、城市重点更新片区为优化对象,城市主要功能区选定依据为城市中某一功能集中连片、特征明显的区域,如工业片区、商业片区、居住片区。城市重点更新片区主要包括三类:拆除重建类片区、有机更新类片区和整治提升类片区。根据片区特点,从碳汇空间的格局、形态调控,碳汇自身组成结构与环境调控等角度对该片区进行碳增汇优化,主要手段包括重要碳汇空间格局与结构优化、重点地段的开发控制。

(3)单元尺度空间优化策略。根据碳源碳汇空间格局特征,选择高碳排放单元、高二氧化碳浓度单元、低效碳汇单元以及大型城市自然空间等重要碳汇单元作为优化对象。通过调整单元空间因子,实现单元内人工与自然碳汇空间的最优化。对关键影响因素进行调控,实现单元综合固碳效能的优化。笔者定义的重要碳汇空间单元是指服务于整个城市的大型公园、湿地、防护绿地等,此类空间通过优化自然空间内各类要素的组分、结构及可调控的环境因素,提升固碳效能(见图5)。

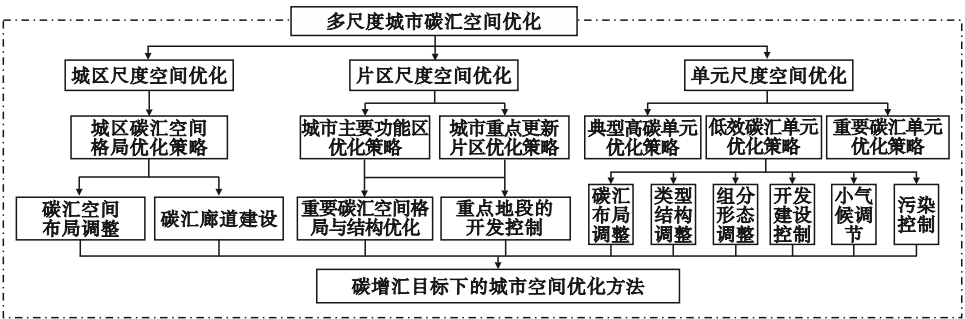


图5 多尺度城市碳汇空间优化路线

Fig.5 Multiscale urban carbon sink space optimization roadmap

5 结 语

笔者立足碳中和目标下城市空间碳增汇的发展需求,对城市复合碳汇空间的固碳效能进行评价,探索城市复合碳汇空间的优化

方法,力求突破城市空间碳增汇研究的理论与技术瓶颈,在对城市复合碳汇空间综合固碳能力进行核算的基础上,通过对人工与自然碳汇耦合协调关系作用下固碳效能的空间影响机制以及人为干扰下大气、水、土壤等要

素对固碳效能的环境影响机制的研究,识别驱动人工与自然碳汇效能耦合协调发展的关键空间因子,识别影响城市复合碳汇空间综合固碳效能的关键环境因子。力求解决制约城市空间碳增汇的关键问题,通过城市复合碳汇空间的优化,改善城市碳汇系统的结构与质量,提升城市碳汇系统的服务功能,实现城市空间综合碳增汇。

参考文献

[ 1 ] FRIEDLINGSTEIN P, O'SULLIVAN M, JONES M W, et al. Global carbon budget 2022 [J]. Earth system science data, 2022, 14: 4811 - 4900.

[ 2 ] 仇保兴. 城市如何实现碳达峰碳中和[J]. 城乡建设, 2021(19): 8 - 15.  
( QIU Baoxing. How to achieve carbon peak and carbon neutrality in cities [J]. Urban and rural construction, 2021(19): 8 - 15. )

[ 3 ] FANG Jingyun. Ecological perspectives of carbon neutrality [J]. Chinese journal of plant ecology, 2021, 45: 1173 - 1176.

[ 4 ] CHEN J, GAO M, CHENG S, et al. County-level CO<sub>2</sub> emissions and sequestration in China 1997—2017 [J]. Scientific data, 2020, 7(1): 391.

[ 5 ] MCPHERSON E G, XIAO Q, AGUARON E. A new approach to quantify and map carbon stored, sequestered and emissions avoided by urban forests [J]. Landscape and urban planning, 2013, 120: 70 - 84.

[ 6 ] 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.  
( WANG Min, SHI Qiaosha. Research on the influencing factors and optimization of urban green carbon sequestration efficiency [J]. China urban forestry, 2015, 13(4): 1 - 5. )

[ 7 ] 姚侠妹, 偶春, 夏璐, 等. 安徽沿淮地区小城镇主要景观树种固碳释氧和降温增湿效益评估[J]. 生态学杂志, 2021, 40(5): 1293 - 1304.  
( YAO Xiamei, OU Chun, XIA Lu, et al. Benefit evaluation of carbon sequestration, oxygen release, cooling and humidifying of the main landscape tree species in small towns along Huaihe river in Anhui province [J]. Chinese journal of ecology, 2021, 40(5): 1293 - 1304. )

[ 8 ] 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.  
( WANG Min, SHI Qiaosha. Evaluation index system and empirical study on green carbon sink efficiency in high density urban areas; a case study of Huangpu district, Shanghai [J]. Chinese landscape architecture, 2016, 32(8): 18 - 24. )

[ 9 ] 宋卓琴, 康红梅, 牛艳, 等. 太原市主要园林植

物春季固碳释氧和降温增湿效应[J]. 山西农业科学, 2018, 46(10): 1685 - 1690.  
( SONG Zhuoqin, KANG Hongmei, NIU Yan, et al. Spring carbon sequestration, oxygen release, and cooling and humidifying effects of main garden plants in Taiyuan city [J]. Shanxi agricultural science, 2018, 46(10): 1685 - 1690. )

[ 10 ] 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.  
( WANG Yonghua, GAO Hanxiao. Research progress on carbon sequestration of urban green spaces [J]. Hubei forestry technology, 2020, 49(4): 69 - 76. )

[ 11 ] ARILUOMA M. Carbon sequestration and storage potential of urban green in residential yards: a case study from Helsinki [J]. Urban forestry & urban greening, 2021, 57: 126939.

[ 12 ] MA J, LI X, JIA B, et al. Spatial variation analysis of urban forest vegetation carbon storage and sequestration in built-up areas of Beijing based on i-Tree Eco and Kriging [J]. Urban forestry & urban greening, 2021, 66: 127 - 141.

[ 13 ] 鲁敏, 秦碧莲, 牛朝阳, 等. 城市植物与绿地固碳释氧能力研究进展[J]. 山东建筑大学学报, 2015, 30(4): 363 - 369.  
( LU Min, QIN Bilian, NIU Chaoyang, et al. Research progress on carbon sequestration and oxygen release capacity of urban plants and green spaces [J]. Journal of Shandong jianzhu university, 2015, 30(4): 363 - 369. )

[ 14 ] 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.  
( ZHANG Ying, LI Xiaoge, WEN Yali. Analysis of carbon sequestration potential in Chinese forests under the background of carbon peaking and carbon neutrality [J]. Journal of Beijing forestry university, 2022, 44(1): 38 - 47. )

[ 15 ] 伍格致, 周妮笛. 湖南省森林碳储量及其经济价值测算研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(8): 127 - 132.  
( WU Gezhi, ZHOU Nidi. Research on forest carbon storage and its economic value calculation in Hunan province [J]. Journal of central south university of forestry and technology, 2015, 35(8): 127 - 132. )

[ 16 ] SURAJ R, KIRAN C, CHANDRA S, et al. Multi-year eddy covariance measurements of net ecosystem exchange in tropical dry deciduous forest of India [J]. Agricultural and forest meteorology, 2021, 15(5): 301 - 302.

[ 17 ] 郭明明, 陈爱军, 李东升, 等. 一种林木微观碳汇计量同化箱装置的设计[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(5): 1291 - 1294.  
( GUO Mingming, CHEN Aijun, LI Dongsheng, et al. Design of a micro carbon sink measurement and assimilation box device for forest trees [J]. Hubei agricultural science, 2016, 55(5): 1291 - 1294. )

[ 18 ] 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.  
(LUO Shanghua, MAO Qizheng, MA Kenning, et al. A review of research on urban soil carbon cycling and carbon sequestration [J]. Journal of ecology, 2012, 32(22): 7177-7189.)
- [19] 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.  
(WANG Xiaohan, ZHANG Guilian, ZHANG Lang, et al. Research progress on soil carbon sequestration in urban green spaces [J]. Landscape architecture, 2022, 39(1): 18-24.)
- [20] ZHANG Pingping, WANG Yunqiang, SUN Hui, et al. Spatial variation and distribution of soil organic carbon in an urban ecosystem from high-density sampling [J]. Catena, 2021, 204: 105364.
- [21] 唐春云, 罗丽. 森林生态系统碳储量及方法研究进展[J]. 绿色科技, 2016(4): 22-26.  
(TANG Chunyun, LUO Li. Research progress on carbon storage and methods in forest ecosystems [J]. Green science and technology, 2016(4): 22-26.)
- [22] 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.  
(TANG Yu, SHI Tiemao, BU Yingjie, et al. Estimation of carbon storage and spatial distribution characteristics of urban green spaces [J]. Journal of ecology, 2020, 39(4): 1387-1398.)
- [23] 张小萌, 李艳红, 王盼盼. 乌鲁木齐城市土壤有机碳空间变异研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(2): 117-121.  
(ZHANG Xiaomeng, LI Yanhong, WANG Panpan. A study on spatial variation of soil organic carbon in urban Urumqi [J]. Resources and environment in arid areas, 2016, 30(2): 117-121.)
- [24] 夏子书, 白一茹, 包维斌, 等. 基于多光谱和地理加权回归模型的石嘴山城市土壤有机碳空间分布研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43(5): 1348-1357.  
(XIA Zishu, BAI Yiru, BAO Weibin, et al. Spatial distribution of urban soil organic carbon in Shizuishan based on multispectral and geographically weighted regression models [J]. Arid region geography, 2020, 43(5): 1348-1357.)
- [25] 杨靖宇, 俞元春, 陈瑜, 等. 南京市不同功能区城市林业土壤有机碳含量与分布[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2016, 40(1): 22-26.  
(YANG Jingyu, YU Yuanchun, CHEN Yu, et al. Organic carbon content and distribution of urban forestry soils in different functional zones of Nanjing city [J]. Journal of Nanjing forestry university (natural science edition), 2016, 40(1): 22-26.)
- [26] 徐丹, 陈敬安, 杨海全, 等. 贵州百花湖分层期水体有机碳及其稳定碳同位素组成分布特征与控制因素[J]. 地球与环境, 2014, 42(5): 59-603.  
(XU Dan, CHEN Jing'an, YANG Haiquan, et al. Distribution characteristics and control factors of organic carbon and stable carbon isotope composition in the stratified water of Baihua Lake in Guizhou [J]. Earth and environment, 2014, 42(5): 59-603.)
- [27] 丁冰岚, 李新举, 姜德娟. 河流水体中碳研究进展[J]. 人民珠江, 2020, 41(11): 37-47.  
(DING Binglan, LI Xinqu, JIANG Dejuan. Research progress on carbon in river water bodies [J]. People's the pearl river, 2020, 41(11): 37-47.)
- [28] YAN Z, SHEN T, LI W, et al. Contribution of microalgae to carbon sequestration in a natural karst wetland aquatic ecosystem: an in-situ mesocosm study [J]. Science of the total environment, 2020, 768: 144387.
- [29] MBABAZI J, INOUE T, YOKOTA K, et al. Variability of particulate bioavailable phosphorus, particulate organic carbon and nitrogen in agricultural and urban rivers [J]. Journal of environmental chemical engineering, 2019, 7(3): 103086.
- [30] 孙标, 杨志岩, 张生, 等. 哈素海沉积物有机质分布与碳储量估计[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(12): 179-183.  
(SUN Biao, YANG Zhiyan, ZHANG Sheng, et al. Organic matter distribution and carbon storage estimation in sediment of Hasuhai [J]. Environmental science and technology, 2018, 41(12): 179-183.)
- [31] YU K, ZHANG Y, HE X, et al. Characteristics and environmental significance of organic carbon in sediments from Taihu lake, China [J]. Ecological indicators, 2022 (138): 108796.
- [32] 朱坤, 吴莹, 齐丽君. 上海城市内河中有机碳含量的时空变化及影响因素分析[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2020, (1): 150-158.  
(ZHU Kun, WU Ying, QI Lijun. Analysis of spatiotemporal changes and influencing factors of organic carbon content in urban rivers of Shanghai [J]. Journal of east China normal university (natural science edition), 2020, (1): 150-158.)
- [33] 白冬锐, 张涛, 陈坦, 等. 苏州古城区域河道碳氮磷类污染物的分布特征[J]. 环境科学, 2020(8): 1-16.  
(BAI Dongrui, ZHANG Tao, CHEN Tan, et al. The distribution characteristics of carbon, nitrogen, and phosphorus pollutants in the rivers of Suzhou ancient city area [J]. Environmental science, 2020(8): 1-16.)
- [34] XI Fengming, STEVEN D, PHILIPPE C, et al. Substantial global carbon uptake by cement carbonation [J]. Nature geoscience, 2016, 9(12): 880-883.
- [35] PACHECO T, SHI C. Carbon dioxide sequestration in cementitious construction materials [M]. Cambridge: Woodhead

Publishing, 2018.

- [36] 李绥, 石铁矛, 王梓通, 等. 基于建筑容量的城市建设用地碳汇量核算方法[J]. 应用生态学报, 2019, 30(3): 986-994.  
(LI Sui, SHI Tiemao, WANG Zitong, et al. Accounting method for carbon sequestration of urban construction land based on building capacity [J]. Journal of applied ecology, 2019, 30(3): 986-994.)
- [37] UENO A, KAWAI K, KOBAYASHI K, et al. Evaluation of visual methods for CO<sub>2</sub> uptake by demolished concrete: research activities by JSCE subcommittee 219 [J]. Construction & building materials, 2014, 67: 393-398.
- [38] 李迅, 曹广忠, 徐文珍. 中国低碳生态城市发展战略[J]. 城市发展研究, 2010, 100(1): 32-39.  
(LI Xun, CAO Guangzhong, XU Wenzhen. Development strategy of low carbon ecological cities in China [J]. Urban development research, 2010, 100(1): 32-39.)
- [39] XI Fengming, SHI Tiemao, WANG Jiaoyue, et al. Review of cement materials carbon sink [J]. Advances in climate change research, 2015, 11(4): 288-296.
- [40] GAJDA J. Absorption of atmospheric carbon dioxide by portland cement concrete [M]. Skokie: Portland Cement Association, 2001.
- [41] POMMER K, PADE C. Guidelines-uptake of carbon dioxide in the life cycle inventory of concrete [M]. Copenhagen: Danish Technological Institute, 2005.
- [42] ANDERSSON R, FRIDH K, STRIPPLE H, et al. Calculating CO<sub>2</sub> uptake for existing concrete structures during and after service life [J]. Environmental science & technology, 2013, 47(20): 11625-11633.
- [43] 刘丽丽, 王娇月, 邴龙飞, 等. 我国钢渣碳汇的量化分析[J]. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3385-3390.  
(LIU Lili, WANG Jiaoyue, BING Longfei, et al. Quantitative analysis of steel slag carbon sink in China [J]. Journal of applied ecology, 2018, 29(10): 3385-3390.)
- [44] 郝凤明, 石铁矛, 王娇月, 等. 水泥材料碳汇研究综述[J]. 气候变化研究进展, 2015, 11(4): 288-296.  
(XI Fengming, SHI Tiemao, WANG Jiaoyue, et al. Review of carbon sink research in cement materials [J]. Progress in climate change research, 2015, 11(4): 288-296.)
- [45] 石铁矛, 周诗文, 李绥, 等. 建筑混凝土全生命周期固碳能力计算方法[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 31(5): 829-837.  
(SHI Tiemao, ZHOU Shiwen, LI Sui, et al. Calculation method for carbon sequestration capacity of building concrete throughout its life cycle [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2015, 31(5): 829-837.)
- [46] 李沛颖, 石铁矛, 王梓通. 单体到区域建筑碳汇计量方法与模型研究[J]. 建筑技术, 2019, 50(6): 714-718.  
(LI Peiying, SHI Tiemao, WANG Zitong. Research on carbon sink measurement methods and models for single to regional buildings [J]. Building technology, 2019, 50(6): 714-718.)
- [47] LI Peiying, SHI Tiemao, BING Longfei, et al. Calculation method and model of carbon sequestration by urban buildings: An example from Shenyang [J]. Journal of cleaner production, 2021(317): 128450.
- [48] 郭冬艳, 杨繁, 高兵, 等. 矿山生态修复助力碳中和的政策建议[J]. 中国国土资源经济, 2021, 34(10): 50-54.  
(GUO Dongyan, YANG Fan, GAO Bing, et al. Policy recommendations for promoting carbon neutrality through ecological restoration in mines [J]. China land and resources economy, 2021, 34(10): 50-54.)
- [49] 马静玉, 程东波. 碳中和愿景下金属矿产行业的挑战与机遇[J]. 科技导报, 2021, 39(19): 48-55.  
(MA Jingyu, CHENG Dongbo. Challenges and opportunities in the metal mineral industry under the vision of carbon neutrality [J]. Science and technology review, 2021, 39(19): 48-55.)
- [50] 晏闻博, 柳丹, 彭丹莉, 等. 重金属矿山生态治理与环境修复技术进展[J]. 浙江农林大学学报, 2015, 32(3): 467-477.  
(YAN Wenbo, LIU Dan, PENG Danli, et al. Progress in ecological management and environmental remediation technology for heavy metal mines [J]. Journal of Zhejiang A&F university, 2015, 32(3): 467-477.)
- [51] 廖程浩, 刘雪华, 张永富. 煤矿石山修复的碳减排效益: 以阳泉矿区为例[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(3): 195-199.  
(LIAO Chenghao, LIU Xuehua, ZHANG Yongfu. Carbon reduction benefits of coal gangue mountain restoration: a case study of Yangquan mining area [J]. Environmental science and technology, 2010, 33(3): 195-199.)
- [52] 刘鹤云. 矿区生态减排能力评估与提升对策研究: 以平朔矿区为例[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.  
(LIU Heyun. Evaluation and improvement of ecological emission reduction capacity in mining areas: a case study of Pingshuo mining area [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.)
- [53] 张黎明, 张绍良, 侯湖平, 等. 矿区土地复垦碳减排效果测度模型与实证分析[J]. 中国矿业, 2015, 24(11): 65-70.  
(ZHANG Liming, ZHANG Shaoliang, HOU Huping, et al. Measurement model and empirical analysis of carbon reduction effect in land reclamation in mining areas [J]. China mining, 2015, 24(11): 65-70.)

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)