

王振坤, 董心悦, 邵明, 姚朋. 国内外城乡绿色空间碳汇研究进展与展望 [J]. 风景园林, 2023, 30 (2) : 115-122.

国内外城乡绿色空间碳汇研究进展与展望

王振坤 董心悦 邵明 姚朋 *

摘要: 【目的】城乡绿色空间是国土空间中发挥碳汇功能的重要空间载体。明确其碳汇相关研究进展, 对优化城乡绿色空间格局、提升碳汇效能具有重要意义。【方法】以城乡绿色空间碳汇为主题, 从相关理论、研究对象、研究内容、计量监测方法 4 个方面梳理研究进展, 总结国内外研究异同与热点领域, 并归纳时段特征。【结果】研究发现, 国内外相关研究在上述 4 个方面上大体呈现相近趋势, 但 2010 年以后在研究内容方面各有侧重; 相关研究热点集中在碳汇计量与评估、碳汇响应机制探究与绿色空间优化实践等领域。

【结论】将研究进展划分为城乡绿色空间碳汇研究萌芽期 (2003 年以前)、聚焦城乡绿色空间本体要素的碳汇研究初期 (2003—2010 年)、面向低碳城市与多领域协同的碳汇研究发展期 (2010—2020 年)、面向“双碳”目标的碳汇研究新时期 (2020 年至今) 4 个阶段, 并对中国未来城乡绿色空间碳汇研究方向提出展望。

关键词: 风景园林; 城乡绿色空间; 碳汇; 碳中和; 低碳城市; 计量监测

基金项目: 北京市自然科学基金“碳中和视角下北京市平原地区绿色空间情景模拟与格局优化研究”(编号 8222022); 北京林业大学科技创新计划项目“北京林业大学杰出青年人才培养项目-姚朋”(编号 2019JQ03010); 北京林业大学热点追踪项目“京津冀地区区域绿地与碳汇效能的多尺度权衡协同评估及模拟优化研究”(编号 2022BLRD08); 中央高校基本科研业务费专项资金“京津冀城市群绿色空间碳效能的空间溢出效应评估及优化研究”(编号 BLX202111)

中图分类号: TU986.2

文献标识码: A

文章编号: 1673-1530(2023)02-0115-08

DOI: 10.12409/j.fjyl.202207310459

收稿日期: 2022-07-31

修回日期: 2022-12-09



开放科学 (资源服务)
标识码 (OSID)

1992 年联合国大会讨论通过的《联合国气候变化框架公约》(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) 将 CO₂ 从大气中清除的过程、活动或机制定义为碳汇 (carbon sink), 将 CO₂ 释放到大气中的过程、活动或机制定义为碳源 (carbon source)^[1]。长期以来, 研究者更多从碳源角度出发, 探索通过优化能源与产业结构, 改进绿色发展方式, 从而逐步减少碳排放的途径; 然而从碳汇角度出发, 对碳固定与存储的有关研究起步较晚, 但该类研究在应对环境与气候变化问题方面具有重大潜力。

城乡绿色空间 (urban and rural green space) 作为城乡发挥碳汇功能的重要空间载体, 在固碳释氧、降温增湿、缓解城市热岛效应、加强社会低碳宣传等方面具有重要作用, 也是打破城乡二元经济社会结构、推动区域生态协同发展的重要着力点。相关研究表明, 中国森林生态系统的净生态系统生产力介于 1.7~5.9 t C hm⁻² a⁻¹ 之间^[2], 而滨海盐沼湿地亦可达 1.9~2.3 t C hm⁻² a⁻¹^[3], 可见城乡绿色空间在发挥碳汇功能过程中扮演着重要角色。然

而, 以往关于城乡绿色空间碳汇的研究多集中在生态学、环境科学等学科, 风景园林视角下对该领域的研究相对不足。

因此, 本研究从风景园林视角出发, 讨论城市建设用地内公园绿地、广场用地、防护绿地、附属绿地等绿色空间类型, 以及城市建设用地外各类区域绿地、林地等在城乡绿色空间的碳汇研究进展, 归纳不同时段特征并总结国内外研究热点与异同, 以期为中国未来城乡绿色空间碳汇研究提供借鉴和参考。

1 国内外城乡绿色空间碳汇研究概况

分别以 Web of Science (WoS) 核心合集数据库^①和中国知网 (CNKI) 为检索平台进行检索, 数据收集时间为 2022 年 10 月^②。首先以 “green space/ 绿色空间 + carbon sink/ 碳汇” 为关键词进行全文检索并进行共现分析, 再分别从中英文文献共现频数最高的 20 个词汇中筛选出 “绿色空间” “绿地” “景观” “风景园林” “碳汇” “固碳” “碳储” 7 个与主题直接相关的词汇进行交叉检索。从 WoS 检索结果中筛选出环境科学、生态学、林学等相关学

科的期刊论文 7 321 篇^③; 从 CNKI 检索结果中筛选除学位论文、刊首语、报道等非相关文献, 得到期刊论文 2 807 篇, 将上述论文作为本研究的中英文文献数据源。

利用 Citespace 5.8.R3 软件对国内外文献数据进行去重处理, 并分别进行关键词突现性分析。排名前 30 的突现词包括 “ecosystem” “boreal forest” “低碳经济” “指标体系” 等, 根据其属性特征可归纳为相关理论、研究对象、研究内容、计量监测方法 4 个方面。

分别以这 4 个方面的突现词为关键词, 在上述数据源中检索并进行文献计量学分析发现: 在相关理论方面, 碳循环理论、低碳经济理论和碳足迹理论与城乡绿色空间关联较密切; 在研究对象方面, 可根据城乡绿色空间的类型与空间尺度、生态系统的类型与结构层次进行划分; 在研究内容方面, 国内外已经开展碳汇计量与评估、增汇导向下绿色空间优化等领域的探讨; 在计量监测方法方面, 已探索出同化量法、微气象法、遥感模型法等诸多方法; 另外, 政府间国际组织、



Schematic diagram of the research on carbon sink in urban and rural green space

逐渐增多;2020 年以来,“碳中和”等成为高频词。可见中文文献在概念解析与应用实践方面已有较多探索。

1.1 相关理论

2003年英国政府发布能源白皮书《我们未来的能源：创建低碳经济》(*Our Energy Future, Creating a Low Carbon Economy*)，首次提出低碳经济理论，在经济性、功能性、生态性等方面对城乡绿色空间做出建设要求。基于此，研究者通过构建低碳城市评价指标体系，对城乡绿色空间低碳发展提出合理化建议^[7]。

相比之下,国内年发文量自2010年大幅增加后趋势总体平稳,2020年以来增长趋势明显。其中,2010年之前的研究聚焦“城市绿地”“生态效益”等方面;2010年后,关于“低碳城市”“城市园林”“空间规划”的研究

从碳元素循环过程的碳循环理论,到低碳理念参与经济、社会多领域建设的低碳经济理论,再到事物全生命周期碳源碳汇的碳足迹理论^[9],城乡绿色空间碳汇相关理论的研究视野已经从聚焦碳汇本体扩展为多领域、全周期的研究,其内涵与外延仍在不断丰富与扩展。

1.2 研究对象

在中国,研究对象同样具有要素—城市—区域的演变特征。早期研究更多关注城乡绿色空间中植被与土壤^[14]等要素的碳汇效能;2010年以来,研究者针对城市建设用地内公园绿地^[15]、防护绿地^[16],以及建设用地外区域绿地^[17]等不同类型的绿色空间的碳汇效能进行了诸多研究;而伴随着区域一体化的发展,研究对象扩展到绿色空间群体与系统层面,以京津冀城市群为代表的区域尺度城乡绿色空间被纳入研究范畴^[18]。

1.3 研究内容

提升绿色空间碳汇能力、应对气候变化问题是城乡绿色空间碳汇研究的一贯主题。其中,国外研究在多尺度城乡绿色空间的碳汇计量监测与生态系统服务评估等方面具有突出进展^[19];国内研究受低碳园林^[20]、区域生态协同发展^[21]、碳中和^[22]等相关政策与理

表 1 城乡绿色空间碳汇计量监测方法汇总^[11, 14-15, 24, 32-44]
Tab. 1 Summary of methods for measurement and monitoring of carbon sink^[11, 14-15, 24, 32-44]

类别	指标 (单位)	方法类型	所需技术方法、仪器或模型	所需数据	适用尺度	优势	不足
固碳	净光合速率 (mol/d; g/s; kg/a)	同化量法	光合作用监测技术	植物生理特征、气象数据	植株	结果相对准确	受环境因素影响较大
		模型法	美国树木效益网络计算器	植被特征、用地类型、地理位置等数据	植株	操作相对简便	不同地区结果有偏差
	净初级生产力 (g/d; t/a)	模型法	CITYgreen 模型、PnET 冠层通量模型等	植被特征、气象、场地特征等数据	从公园到城市	综合考虑气候因素, 计算结果相对全面	模型误差较大; 所需数据较多
		遥感模型模拟	CASA 模型、BIOME-BGC 模型等	遥感、气象、土壤、陆地生态系统类型等数据	区域及更大	快速估算大尺度空间碳汇	小尺度空间估算误差较大
	土壤固碳速率 (g/d; t/a)	间接估算法	碳氧平衡原理	植被特征、自然或人为干扰等数据	区域及更大	不需要土壤数据	受限于森林资源清查资料, 误差较大
	净生态系统生产力 (g/d; t/a)	微气象法	涡度相关技术	微气象数据	样方	利于掌控植物生理的动态变化	受下垫面影响较大
碳储	生物量 ^⑤ (kg; t)	直接测量法	取样并烘干称重	植株各部分重量	从植株到样方	结果较为精确	需要大量实验样本; 取样具有破坏性
		系数法	材积源生物量法、生物量转换因子法、生物量转换因子连续函数法等	植被特征、生物量转换因子等数据	城市及更大	时间连续性强, 资料覆盖范围广	忽略了小胸径林木和环境影响
		平均生物量法	异速生长方程、平均标准木解析法	植物生理特征、标准木生物量等数据	从植株到公园	快速、便捷	对人为养护或大林龄林分的测量误差较大
		遥感反演估算	高光谱影像反演、多光谱遥感影像反演等	遥感影像、样方实测生物量等数据	城市及更大	快速估算大尺度空间生物量	小尺度空间估算误差较大
		模型法	CENTURY 模型	气象、土壤、植物物候和生理特征等数据	城市及更大	贴近植物真实生长状况	所需数据较多
	碳储量 (kg; t)	直接测量法	干烧法、湿烧法	植株各部分重量	从植株到样方	计量结果较为精确	需要大量实验样本; 取样具有破坏性
			环刀法、TOC 分析仪	土壤相关参数	样方及更大	不受土壤深度和面积影响	需要大量实验样本
		系数法	蓄积量、生物量转换因子法	蓄积量、生物量、转换因子	全尺度	时间连续性强, 资料覆盖范围广	忽略了小胸径林木和环境影响
		模型法	k-NN 模型、InVEST 模型、EDCM 模型等	植被特征、场地特征、气象、样方碳储量等数据	从植株到区域	大尺度空间估算较为准确; 适应多种情景	小尺度空间估算误差较大; 样方选取对结果影响较大
		遥感模型模拟	BIOME-BGC 模型、遥感反演模型等	地理信息、土壤、气象、植被等数据	区域及更大	对植物生理过程与环境因素考虑相对全面	缺少对林龄的考量; 模型相对复杂

念影响较大，在政策解析与实证分析方面较为突出，具有明显的阶段性特征。具体来看，国内外研究内容均集中在 4 个方面。

1) 在相关政策与理论研究方面，国内外学者结合气候变化背景与碳中和相关政策演进，对风景园林的学科定位与应对策略进行梳理。其中，国外研究聚焦林业政策影响下森林等生态系统的碳汇效能^[23]；国内研究更多在辨析低碳园林概念及其与低碳城市关系的基础上探讨低碳园林的发展策略^[19]，特别是自中国 2020 年明确“双碳”目标以来，对于城乡绿色空间碳汇能力建设任务与路径的探讨进一步深入，为绿色空间的低碳设计提供了理论指导。

2) 在碳汇计量与评估方面，相关研究从聚焦单一生态要素碳汇能力评估，发展到面向绿色空间全要素碳汇的综合评估，具体包括对城乡绿色空间固碳和碳储的计量监测以

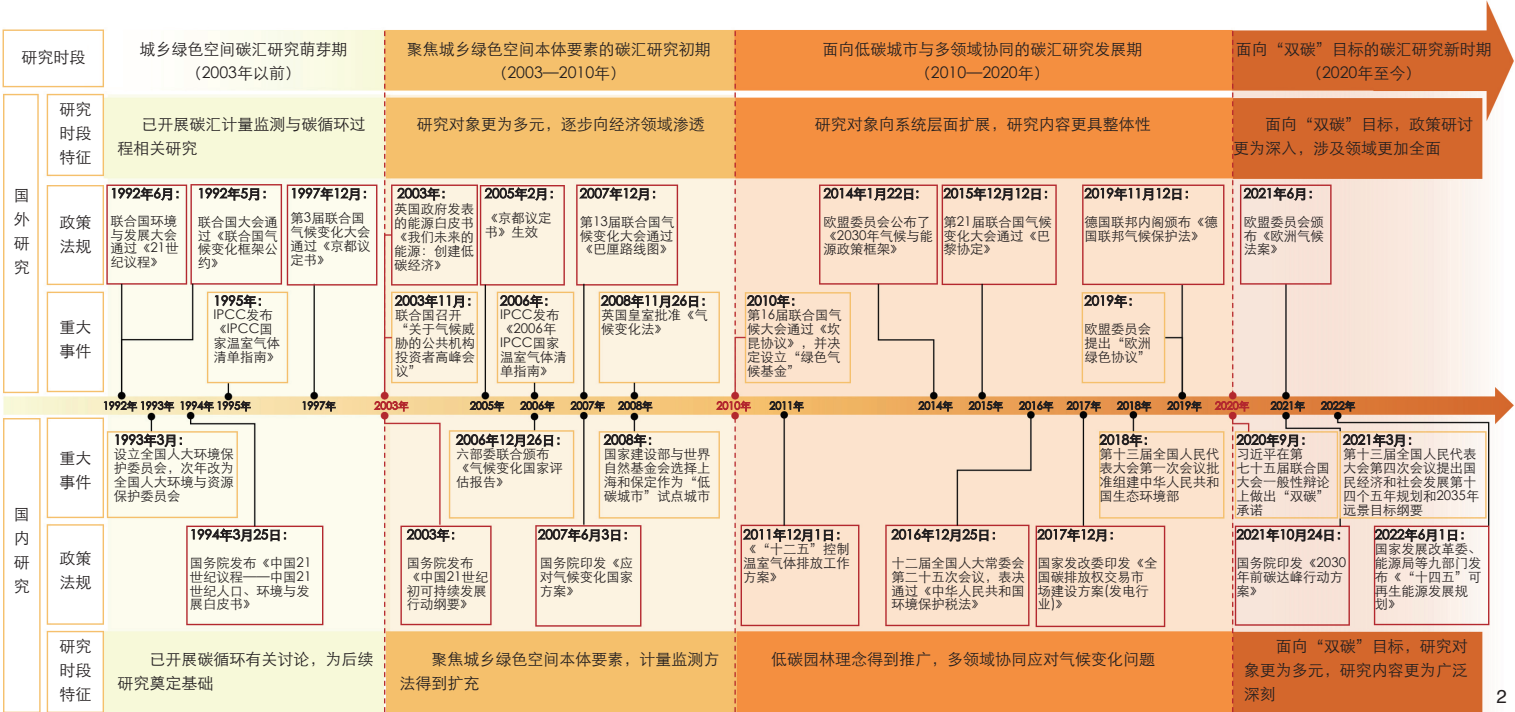
及对低碳园林、低碳城市的综合评价。从碳汇计量结果来看，不同类型绿色空间的碳汇能力具有显著差异^[24]，但受人为活动的影响，其碳汇效能仍具有不确定性^[21]。在市域及区域层面，研究者利用城市群 RI-AER-FTIE 低碳规划模型^[25]、InVEST 模型^[26]等，对绿色空间碳汇特征进行评价，进而提出针对性的绿色空间优化策略与碳收支横向补偿方案。

3) 在碳汇响应机制方面，宏观层面的研究更多关注绿色空间的数量与空间格局^[17]对碳汇效能的影响机理，还拓展到探究土地利用方式、人口规模、经济发展程度^[27]等经济社会因素对碳汇的驱动机制；在微观层面，不同类型绿色空间在总体规模、分布格局、几何形态、植物配置以及场地使用等方面存在较大差异，通过固碳增汇、降温减排和绿色慢行 3 个途径对绿色空间的碳汇效能产生重要影响^[22]。

4) 在以增汇为导向的城乡绿色空间优化途径方面，相关研究着眼于宏观系统构建与微观个体增效 2 个维度，从增量与提质 2 个途径为绿色空间提出优化策略。在宏观层面，基于碳汇功能评价与游憩服务功能评价，筛选自然基底佳、碳汇能力强、游憩服务潜力高的可建设区域，优化城乡绿色空间格局，从而改善其碳汇与游憩服务功能^[28-29]；在微观层面，通过合理增加绿地面积，配置固碳能力强、碳储量大的树种^[30]，改进施工与养护技术，在设计、建造、维护等不同阶段^[31]提升绿色空间的碳汇绩效。

1.4 计量监测方法

总体来看，已有多种方法可用于城乡绿色空间碳汇的计量监测，以应对不同目标导向、不同空间尺度、不同环境与数据条件的多种碳汇计量需求（表 1）。



2 城乡绿色空间碳汇研究历程
Research history of carbon sink in urban and rural green space

其中，建设用地内的公园绿地、防护绿地等绿色空间通常面积较小且内部结构相对复杂，常利用同化量法、微气象法、模型法等方法对其进行精确测量；对于建设用地外的区域绿地、林地，或市域及区域尺度的大面积绿色空间，研究者多借助遥感模型^[19]、数学模型^[44]等方法，结合样地清查进行快速的碳汇计量监测。然而，受样本选取和数据来源的制约，现有方法的计量结果仍具有较大误差。

2 国内外城乡绿色空间碳汇研究进展及时段特征

综合上述分析，国内外研究在相关理论、研究对象、研究内容、计量监测方法等方面具有较明显的阶段性特征。其中，国外在2010年以前已经开展了关于碳循环理论和碳汇计量监测的研究，后期逐步向经济领域渗透；2010年以来研究对象扩充至多种生态系统类型和多个空间尺度的城乡绿色空间，并加强了对于碳汇影响因素的探讨。国内在2003年以前已有关于碳循环的讨论；之后在碳汇计量监测方面取得较大进展；2010年以后，低碳园林理念得到推广，经济、社会等多领域协同应对气候变化的局面逐渐形成；

2020年以来，面向“双碳”目标，研究对象更为多元，研究内容更为广泛。基于此，本研究将城乡绿色空间碳汇研究进展及历程划分为4个时段（图2）。

2.1 城乡绿色空间碳汇研究萌芽期（2003年以前）

自1992年《联合国气候变化框架公约》通过以来，全世界更加关注控制CO₂等温室气体排放、应对全球气候变暖等环境问题，但并未充分认识到城乡绿色空间的碳固定和碳存储能力有助于应对气候变化问题。

国外早期研究从农林相关产业出发，针对森林等典型生态系统开展了固碳和碳储的计量监测研究^[45]，在生态系统碳循环过程方面有一定探索。国内业已开展与碳循环有关的讨论^[1]，对城市绿地的碳汇功能有了初步认识，为后续研究奠定了理论基础。

2.2 聚焦城乡绿色空间本体要素的碳汇研究初期（2003—2010年）

2003年，英国政府首次提出“低碳经济”；2005年，《京都议定书》（Kyoto Protocol）正式生效。在这一时段，国内外更多聚焦于城乡绿色空间本体要素碳汇特征的量化研究，并延伸出对绿色空间碳汇影响因素的探讨。

国外研究延续了对城乡绿色空间中森林植被、土壤等要素碳汇特征的评估，对土地利用方式、管理政策等碳汇影响因素进行了探讨^[23]；国内研究则聚焦于建设用地内多种绿色空间^[34]、建设用地外森林^[46]等植被碳汇特征。相关研究也使得涡度相关技术、遥感等技术方法得到推广^[46]。

2.3 面向低碳城市与多领域协同的碳汇研究发展期（2010—2020年）

随着2010年《坎昆协议》（Cancun Agreement）与2015年《巴黎协定》（Paris Agreement）等文件的讨论通过，低碳园林理念下以共生、循环为特征的城市园林绿地建设思路逐渐被接受，在一定程度上刺激了城乡绿色空间碳汇研究向经济、社会等多领域协同方向发展。

在这一时段，研究者在评价城乡绿色空间碳汇效能的基础上，通过构建低碳城市评价指标体系，为中国低碳城市建设提供评估依据^[7]，并提出针对性的低碳城市评估-营建方法。另外，地区经济发展水平等经济、社会因素对于城乡绿色空间碳汇的影响愈发受到关注^[27]，多领域协同应对气候变化的局面逐渐形成。

2.4 面向“双碳”目标的碳汇研究新时期 (2020 年至今)

2020 年 9 月,习近平主席在第 75 届联合国大会上做出“双碳”承诺以来,中国“双碳”工作的顶层设计逐步展开,世界多国亦相继出台“碳中和”有关法规,国内外研究者在探讨既有政策法规的同时,深入探索新时期风景园林应对气候变化的角色定位与实施路径^[22],城乡绿色空间碳汇研究步入新的历史阶段。

这一时期,研究者或利用遥感等技术,对市域或更大尺度绿色空间碳汇效能进行评价和预测^[23],或是对公园等建设用地内绿色空间碳汇进行更精确的计量监测^[24],同时更加关注城乡绿色空间的空间分布与形态、植物与设施配置方式等物质空间特征^[25],以及游人活动等非物质空间特征对碳汇的影响^[21]。基于此,研究者开展了宏观层面绿色空间格局优化^[26]、微观层面绿色空间植物配置优化^[30]以及全生命周期角度城乡绿色空间优化等方面的探索^[31]。

3 研究总结与展望

3.1 研究总结

本研究通过梳理国内外城乡绿色空间碳汇研究在相关理论、研究对象、研究内容、计量监测方法等方面的进展和时段特征,对国内外研究热点与异同进行总结。

1) 国内外研究热点集中在碳汇计量与评估、碳汇响应机制探究、绿色空间优化实践等领域。在碳汇计量与评估方面,学者更多关注小尺度绿色空间碳汇的精确计量^[15]和大尺度绿色空间碳汇的快速计量监测^[28]等方面;在碳汇响应机制探究领域,国内外研究多聚焦于碳循环过程模拟与碳汇周期研究评估、碳汇驱动因素与驱动机制识别^[27]等方面;在城乡绿色空间优化实践领域,绿色空间全生命周期的碳足迹评估^[47]、不同情景下碳汇模拟预测^[37]等是当前的研究热点。

2) 国内外相关研究在相关理论、研究对象、研究内容与计量监测方法等方面呈现相近趋势。其中,相关理论研究从内涵向外延拓展,碳循环、低碳经济等多个理论的内涵

不断被扩充,并逐渐向经济、社会等领域渗透;研究对象从要素向系统转变,即从植被、土壤等要素逐步扩展到不同类别、尺度和层级的城乡绿色空间;研究内容与方法则趋于多领域协同和完善,从碳汇计量监测,拓展到与经济、社会等多领域结合,进而探究碳汇的响应机制与优化途径,相应的计量监测方法体系亦不断完善。

3) 在相关研究早期阶段,国内外关于绿色空间要素的研究虽然进展相似,但随着研究的推进,研究领域则各有侧重。由于国内外在国土空间尺度、社会意识形态与发展模式、行政区划管理组织架构等方面存在较大差异,国外研究更多集中在针对绿色空间要素的碳汇计量与评估、针对绿色空间个体的碳汇响应机制识别等方面;而国内自 2010 年以来,有关宏观尺度下城乡绿色空间碳汇的研究进入快速发展阶段,在绿色空间规划与设计等方面进行了较多实践探索。

3.2 展望

当前中国在城乡绿色空间碳汇研究方面已经取得了诸多进展,但相关研究起步较晚,与国外存在一定差距。面向碳中和发展目标,本研究认为需加强三方面的探索。

3.2.1 建立城乡绿色空间碳汇计量监测平台与核算标准体系

了解城乡绿色空间碳汇的关键驱动因素、特征和影响是提升其碳汇效能的先决条件,需要广泛、一致、可靠的长期观测^[48]。当前,欧洲综合碳监测系统(integrated carbon observation system, ICOS)通过大规模采样,对数据进行标准化处理,在温室气体长期监测与研究方面已初见成效^[49]。然而,国内在这方面尚处于自发性研究阶段,一方面受计量方法、样本选取和数据来源制约,计量结果仍具有不确定性^[3];另一方面,随着区域协同发展的扎实推进,碳收支核算与横向补偿等工作迫切需要统一的核算标准体系。因此,建立城乡绿色空间碳汇计量监测平台与核算标准体系,具有较强的紧迫性和重要意义。

3.2.2 进一步明确城乡绿色空间碳汇的驱动响应机制

国内外研究者已经建立并优化了 CASA 模

型^[36]、BIOME-BGC 模型^[37]等过程模型,对碳循环过程做了系统考量,初步掌握了国内经济发展水平、产业模式等因素对于城乡绿色空间碳汇的驱动作用。然而,城乡绿色空间碳汇的驱动因素较多,机制相对复杂,现有模型仍存在一定局限性,还需探索出更为普适的“模型-数据”综合方法,从而进一步完善城乡绿色空间资源配置,提升其碳汇效能。

3.2.3 探索以风景园林实践为抓手的多学科协同增汇途径

随着城乡绿色空间碳汇研究不断向纵深发展,绿色空间碳汇的响应机制日渐明晰,而“双碳”目标的提出以及经济社会的快速发展,也对城乡绿色空间碳汇提出了更高的要求。风景园林学作为多学科交叉的核心学科,在国土空间规划、城市总体规划、城市绿地系统规划、园林设计和园林工程等多项实践过程中,与地理学、生态学、林学、草学等学科,在碳汇计量监测、驱动因素与机制识别、绿色空间优化等方面形成学科间的协同与互补,这为当下中国社会开展城乡绿色空间规划设计实践,实现绿色空间增汇提供了更好的途径与方法。

注释 (Notes):

- ① 因 CiteSpace 平台对数据格式的限制,本研究英文文献取自 WoS 核心合集数据库,获取的文献发表于 2003 年 1 月—2022 年 10 月。同时,笔者以相同方式在 WoS 所有数据库中检索,对 2003 年以前的国外研究予以补充说明。
- ② 指论文退修过程中作者再次检索的时间,此次检索结果与所得结论较投稿时无显著差别。
- ③ 根据 WoS 类别,相关学科包括: Environmental Sciences (4 619 篇)、Ecology (2 361 篇)、Forestry (1 099 篇)、Environmental Studies (840 篇)、Urban Studies (210 篇),部分文献隶属多个类别。
- ④ 指用于文献计量学分析的英文文献,检索结果中发表时间最早为 2003 年,详见注释①。
- ⑤ 考虑到植被生物量与碳储量有较强的相关性,且植被碳储量可以近似由生物量与转换因子相乘得到,故在此展示生物量计量监测常用方法。

参考文献 (References):

- [1] WHITE A, CANNELL M G R, FRIEND A D. Climate Change Impacts on Ecosystems and the Terrestrial Carbon Sink: A New Assessment[J]. Global Environmental Change, 1999, 9: S21-S30.

- [2] YU G R, ZHU X J, FU Y L, et al. Spatial Patterns and Climate Drivers of Carbon Fluxes in Terrestrial Ecosystems of China[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(3): 798-810.
- [3] 谢立军, 白中科, 杨博宇, 等. 碳中和背景下国内外陆地生态系统碳汇评估方法研究进展 [J]. *地学前缘*, 2023, 30 (2) : 447-462.
- XIE L J, BAI Z K, YANG B Y, et al. Carbon Sequestration Assessment Methods at Home and Abroad for Terrestrial Ecosystems: Research Progress in Achieving Carbon Neutrality[J]. *Earth Science Frontier*, 2023, 30(2): 447-462.
- [4] DORMANN C F. Consequences of Manipulations in Carbon and Nitrogen Supply for Concentration of Anti-herbivore Defence Compounds in *Salix Polaris*[J]. *Écoscience*, 2003, 10(3): 312-318.
- [5] MOORE B III, BRASWELL J B H, 刘文新. 地球的新陈代谢: 了解碳循环 [J]. *AMBIO- 人类环境杂志*, 1994, 23 (1) : 4-12.
- MOORE B III, BRASWELL J B H, LIU W X. Earth's Metabolism: Understanding the Carbon Cycle[J]. *AMBIO-A Journal of the Human*, 1994, 23(1): 4-12.
- [6] 赵荣钦, 黄贤金. 城市系统碳循环: 特征、机理与理论框架 [J]. *生态学报*, 2013, 33 (2) : 358-366.
- ZHAO R Q, HUANG J X. Carbon Cycle of Urban System: Characteristics, Mechanism and Theoretical Framework[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(2): 358-366.
- [7] 袁晓玲, 雷厉, 仲云云. 低碳经济评价指标体系构建及实证分析 [J]. *城市问题*, 2013 (1) : 56-61.
- YUAN X L, LEI L, ZHONG Y Y. Indicator System Construction and Empirical Analysis of China's Low Carbon Economic Development[J]. *Urban Problems*, 2013(1): 56-61.
- [8] WACKERNAGEL M, REES W. Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth[M]. Gabriola Island, B.C.: New Society Publishers, 1998.
- [9] 计军平, 马晓明. 碳足迹的概念和核算方法研究进展 [J]. *生态经济*, 2011 (4) : 76-80.
- JI J P, MA X M. Review of Carbon Footprint: Definitions and Accounting Methods[J]. *Ecological Economy*, 2011(4): 76-80.
- [10] LARSEN H N, HERTWICH E G. The Case for Consumption-Based Accounting of Greenhouse Gas Emissions to Promote Local Climate Action[J]. *Environmental Science and Policy*, 2009, 12(7): 791-798.
- [11] 王斌, 刘某承, 周志春. 1999—2008 年间中国森林土壤碳汇功能初步估算 [J]. *资源与生态学报 (英文版)*, 2022, 13 (1) : 17-26.
- WANG B, LIU M C, ZHOU Z C. Preliminary Estimation of Soil Carbon Sequestration of China's Forests During 1999—2008[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2022, 13(1): 17-26.
- [12] PAW U K T, FALK M, SUCHANEK T H, et al. Carbon Dioxide Exchange Between an Old-Growth Forest and the Atmosphere[J]. *Ecosystems*, 2004, 7(5): 513-524.
- [13] MULUNCH M G, WORKU B B. Contributions of Urban Green Spaces for Climate Change Mitigation and Biodiversity Conservation in Dessie City, Northeastern Ethiopia[J]. *Urban Climate*, 2022, 46: 101294.
- [14] 常宗强, 冯起, 司建华, 等. 祁连山不同植被类型土壤碳贮量和碳通量 [J]. *生态学杂志*, 2008 (5) : 681-688.
- CHANG Z Q, FENG Q, SI J H, et al. Soil Carbon Storage and CO₂ Flux Under Different Vegetation Types in Qilian Mountains[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008(5): 681-688.
- [15] 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.
- LI X, SUN R, LI Y, et al. Carbon Dioxide Fluxes on Green Space in Haidian Park, Beijing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(24): 6715-6725.
- [16] 李敦禧, 杨众养, 宿少锋, 等. 岛东林场沿海防护林木麻黄生物量与碳储量价值研究 [J]. *热带林业*, 2017, 45 (3) : 27-30.
- LI D X, YANG Z Y, SU S F, et al. Study on Biomass and Carbon Storage Value of *Casuarina Equisetifolia* in Coastal Forest of Daodong Forest Farm[J]. *Tropical Forestry*, 2017, 45(3): 27-30.
- [17] 李威, 黄玫, 张远东, 等. 中国国家森林公园碳储量及固碳速率的时空动态 [J]. *应用生态学报*, 2021, 32 (3) : 799-809.
- LI W, HUANG M, ZHANG Y D, et al. Spatial-Temporal Variations of Carbon Storage and Carbon Sequestration Rate in China's National Forest Parks[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(3): 799-809.
- [18] 邱陈澜, 王彩侠, 章瑞, 等. 京津冀城市群生态空间固碳服务功能及其与景观格局的关系特征研究 [J]. *生态学报*, 2022, 42 (23) : 9590-9603.
- QIU C L, WANG C X, ZHANG R, et al. Characteristics of Ecological Space Carbon Sequestration Service Function and Its Relationship with Landscape Pattern in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(23): 9590-9603.
- [19] TURNER D P, GUZY M, LEFSKY M A, et al. Monitoring Forest Carbon Sequestration with Remote Sensing and Carbon Cycle Modeling[J]. *Environmental Management*, 2004, 33(4): 457-466.
- [20] 滕明君, 周志翔, 岳辉, 等. 低碳园林的生态学途径 [J]. *中国园林*, 2012, 28 (4) : 40-43.
- TENG M J, ZHOU Z X, YUE H, et al. Ecological Approach of Low-Carbon Urban Landscape[J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2012, 28(4): 40-43.
- [21] 宋苑震, 覃盟琳, 袁倩文, 等. 碳平衡导向下北部湾城市群碳汇用地布局优化研究 [J]. *广西大学学报 (自然科学版)* 2020, 45 (5) : 1071-1082.
- SONG Y Z, QIN M L, YUAN Q W, et al. Research on the Optimization of Territorial Space Carbon Sink Land Layout of Beibu Gulf Urban Agglomeration Based on Carbon Balance[J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, 2020, 45(5): 1071-1082.
- [22] 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.
- WANG M, SONG H Y. Spatial Characteristics and Implementation Framework for Fine Control of Urban Green Space Affecting Carbon Neutrality[J]. *Landscape Architecture*, 2022, 29(5): 17-23.
- [23] GARCIA-GONZALO J, PELTOLA H, GERENDIAIN A Z, et al. Impacts of Forest Landscape Structure and Management on Timber Production and Carbon Stocks in the Boreal Forest Ecosystem Under Changing Climate[J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 241(1-3): 243-257.
- [24] 殷伟达, 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.
- YIN W D, SU J Y, XU Z Y, et al. Estimation and Application of Urban Green Space Carbon Storage Based on Remote Sensing Technology[J]. *Landscape Architecture*, 2022, 29(5): 24-30.
- [25] 覃盟琳, 黎小元, 袁倩文, 等. 北部湾城市群 (广西) 低碳空间结构评价与优化策略 [J]. *规划师*, 2019, 35 (13) : 82-86.
- TAN M L, LI X Y, YUAN Q W, et al. Evaluation and Optimization of Low-Carbon Spatial Structure of Urban Agglomeration in Beibu Gulf of Guangxi[J]. *Planners*, 2019, 35(13): 82-86.
- [26] 吴隽宇, 张一蕾, 江伟康. 粤港澳大湾区生态系统碳储量时空演变 [J]. *风景园林*, 2020, 27 (10) : 57-63.
- WU J Y, ZHANG Y L, JIANG W K. Spatio-Temporal Evolution of Ecosystem Carbon Storage in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. *Landscape Architecture*, 2020, 27(10): 57-63.
- [27] 薛龙飞, 罗小锋, 李兆亮, 等. 中国森林碳汇的空间溢出效应与影响因素: 基于大陆 31 个省 (市、区) 森林资源清查数据的空间计量分析 [J]. *自然资源学报*, 2017, 32 (10) : 1744-1754.
- XUE L F, LUO X F, LI Z L, et al. Spatial Spillover Effects and Influencing Factors of Forest Carbon Sink in China: Spatial Econometric Analysis Based on Forest Resources Inventory in 31 Provinces of the Mainland of China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(10): 1744-1754.
- [28] 葛韵宇, 李雄. 基于碳汇和游憩服务协同提升的北京市第二道绿化隔离地区郊野公园环境空间布局优化 [J]. *北京林业大学学报*, 2022, 44 (10) : 142-154.
- GE Y Y, LI X. Spatial Layout Optimization of Country Parks in the Second Green Belt of Beijing Municipality Area Based on the Coordinated Improvement of Carbon Sequestration and Recreational Services[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2022, 44(10): 142-154.
- [29] 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.
- WANG M, ZHU W. The Impact of Urban Green Space on Carbon Neutrality and Spatial Characteristics: A Case Study of Huangpu District in Shanghai[J]. *Landscape Architecture Academic Journal*, 2021, 38(10): 11-18.
- [30] 罗玉兰, 张冬梅, 张浪, 等. 基于“双碳”目标的城市绿化树种筛选及配置研究: 以上海世博公园为例 [J]. *园林*, 2022, 39 (1) : 25-32.
- LUO Y L, ZHANG D M, ZHANG L, et al. Study on Selection and Collocation of Urban Greening Tree Species Under Dual Carbon Goal: A Case Study of Shanghai Expo Park[J]. *Landscape Architecture Academic Journal*, 2022, 39(1): 25-32.
- [31] 李惊, 吴佳鸣, 汪文清. 碳中和目标下的风景园林规划设计策略 [J]. *风景园林*, 2022, 29 (5) : 45-51.
- LI L, WU J M, WANG W Q. Landscape Planning and Design Strategies Under Carbon Neutrality Goal[J]. *Landscape Architecture*, 2022, 29(5): 45-51.
- [32] 薛海丽, 唐海萍, 李延明, 等. 北京常见绿化植物生态调节服务研究 [J]. *北京师范大学学报 (自然科学版)*, 2018, 54 (4) : 517-524.
- XUE H L, TANG H P, LI Y M, et al. Regulation Service of Main Greening Tree Species in Beijing[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2018, 54(4): 517-524.
- [33] 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 M, SHI Q S. Evaluation Index System and Empirical Study on Green Carbon Sequestration Efficiency in Urban High Density Area: A Case Study of Shanghai Huangpu District[J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2016, 32(8): 18-24.
- [34] 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.

XU F, LIU W H, REN W L, et al. Effects of Community Structure on Carbon Fixation of Urban Forests in Shanghai, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(3): 439-447.

[35] 吴婕, 李楠, 陈智, 等. 深圳特区城市植被的固碳释氧效应 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 2010, 49 (4) : 86-92.

WU J, LI N, CHEN Z, et al. The Effect of CO₂ Sequestration and O₂ Release of Urban Vegetation in Shenzhen Special Zone[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2010, 49(4): 86-92.

[36] 温宥越, 孙强, 燕玉超, 等. 粤港澳大湾区陆地生态系统演变对固碳释氧服务的影响 [J]. 生态学报, 2020, 40 (23) : 8482-8493.

WEN Y Y, SUN Q, YAN Y C, et al. Impacts of the Terrestrial Ecosystem Changes on the Carbon Fixation and Oxygen Release Services in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8482-8493.

[37] 刘腾艳, 毛方杰, 李雪建, 等. 浙江省竹林地上碳储量的时空动态模拟及影响因素 [J]. 应用生态学报, 2019, 30 (5) : 1743-1753.

LIU T Y, MAO F J, LI X J, et al. Spatiotemporal Dynamic Simulation on Aboveground Carbon Storage of Bamboo Forest and Its Influence Factors in Zhejiang Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(5): 1743-1753.

[38] 王迪生. 北京城区园林植物生物量的计测研究 [J]. 林业资源管理, 2009 (4) : 120-125.

WANG D S. Research on Measurement of Urban Landscape Plants' Biomass in Beijing City[J]. Forest Resources Management, 2009(4): 120-125.

[39] 赵敏, 周广胜. 基于森林资源清查资料的生物量估算模式及其发展趋势 [J]. 应用生态学报, 2004, 15 (8) : 1468-1472.

ZHAO M, ZHOU G S. Forest Inventory Data (FID)-Based Biomass Models and Their Prospects[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(8): 1468-1472.

[40] 陆超, 沈建军, 王秀云, 等. 温州城区绿地生物量时空动态变化研究 [J]. 浙江林业科技, 2017, 37 (4) : 18-23.

LU C, SHEN J J, WANG X Y, et al. Spatiotemporal Dynamics of Biomass of Green Space in the City Proper of Wenzhou[J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2017, 37(4): 18-23.

[41] 肖向明, 王义凤, 陈佐忠. 内蒙古锡林河流域典型草原初级生产力和土壤有机质的动态及其对气候变化的反应 [J]. 植物学报 (英文版), 1996, 38 (1) : 45-52.

XIAO X M, WANG Y F, CHEN Z Z. Dynamics of Primary Productivity and Soil Organic Matter of Typical Steppe in the Xilin River Basin of Inner Mongolia and Their Response to Climate Change[J]. Acta Botanica Sinica, 1996, 38(1): 45-52.

[42] 周东洋, 王晓雨, 朱向涛, 等. 亚热带常绿阔叶林 5 个优势树种的树干碳氮磷质量分数估算及其不确定性分析 [J]. 浙江农林大学学报, 2022, 39 (4) : 727-733.

ZHOU D Y, WANG X Y, ZHU X T, et al. Estimation and Uncertainty Analysis of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Concentrations in Trunks of Five Dominant Tree Species in Subtropical Evergreen Broadleaved Forests[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2022, 39(4): 727-733.

[43] LIU S G, BLISS N, SUNDQUIST E, et al. Modeling Carbon Dynamics in Vegetation and Soil Under the Impact of Soil Erosion and Deposition[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2003, 17(2): 43-67.

[44] 谭一凡, 鄢广平, 王敏姿, 等. 深圳市建成区森林碳分布估测方法比较研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34 (11) : 140-144.

TAN Y F, QIE G P, WANG M Z, et al. Comparison of Landsat 8 Images Based City Forest Carbon Modeling for Shenzhen Built-up Area[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2014, 34(11): 140-144.

[45] SKOLE D L, HOUGHTON R A, BOONE R D, et al. Net Flux of Carbon Dioxide from Tropical Forests in 1980[J]. Nature, 1985, 316(6029): 617-620.

[46] 曹吉鑫, 田赞, 王小平, 等. 森林碳汇的估算方法及其发展趋势 [J]. 生态环境学报, 2009, 18 (5) : 2001-2005.

CAO J X, TIAN Y, WANG X P, et al. Estimation Methods of Forest Sequestration and Their Prospects[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(5): 2001-2005.

[47] 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.

HUANG L J, ZHANG Y, DENG Y R, et al. The Carbon Footprint Accounting and Assessment of Urban Green Space: Taking Guangzhou as an Example[J]. Forest Resources Management, 2017 (2): 65-73.

[48] SENEVIRATNE S I, ROGELJ J, SÉFÉRIAN R, et al. The Many Possible Climates from the Paris Agreement's Aim of 1.5 C Warming[J]. Nature, 2018, 558(7708): 41-49.

[49] FRANZ D, ACOSTA M, ALTIMIR N, et al. Towards Long-Term Standardised Carbon and Greenhouse Gas Observations for Monitoring Europe's Terrestrial Ecosystems: A Review[J]. International Agrophysics, 2018, 32(4): 439-455.

图表来源 (Sources of Figures and Table):

文中图表均由作者绘制。

(编辑 / 李卫芳 李清清)

作者简介:

王振坤 / 男 / 北京林业大学园林学院在读硕士研究生 / 研究方向为风景园林规划与设计

董心悦 / 女 / 北京林业大学园林学院在读硕士研究生 / 研究方向为风景园林规划与设计

邵明 / 男 / 博士 / 北京林业大学园林学院讲师 / 研究方向为风景园林规划与设计、绿色空间生态系统服务与大数据分析

姚朋 / 男 / 博士 / 北京林业大学园林学院副院长、教授 / 研究方向为风景园林规划与设计、城乡人居环境
通信作者邮箱: chinayp815@163.com

更正

刊登于本刊2023年第1期《健康公园健康人——依托自然保护地促进公共健康的国际经验》一文第38、44页DOI有误, 应为: 10.12409/j.fjyl.202206240361。

《风景园林》编辑部

WANG Z K, DONG X Y, SHAO M, YAO P. Progress and Prospects of Research on Carbon Sink in Urban and Rural Green Spaces at Home and Abroad[J]. Landscape Architecture, 2023, 30(2): 115-122. DOI: 10.12409/j.fjyl.202207310459.

Progress and Prospects of Research on Carbon Sink in Urban and Rural Green Spaces at Home and Abroad

WANG Zhenkun, DONG Xinyue, SHAO Ming, YAO Peng*

Abstract:

[Objective] Urban and rural green space as an important carrier of carbon sink function in territorial space, plays an important role in such aspects as carbon sequestration and oxygen release, cooling and humidification, alleviation of urban heat island effect, and enhancement of social low-carbon publicity. As an important acting point for breaking the urban-rural dual economic and social structure, implementing the scientific development concept, and promoting the coordinated development of regional ecology, urban and rural green space is of great significance for optimizing urban and rural green spatial pattern and improving the efficiency of carbon sink to clarify the research progress of carbon sink.

[Methods] This research, in the theme of carbon sink in urban and rural green space, conducts a literature metrology analysis on 7,321 English journals and 2,807 Chinese academic journal papers. In addition, the research reviews the research progress of carbon sink in urban and rural green space from the four aspects of relevant theories, research objects, research contents and measurement monitoring methods, and summarizes the similarities and differences between and hotspots and duration characteristics of domestic and foreign researches on carbon sink in urban and rural green space.

[Results] The hotspots and frontiers in both domestic and foreign researches on carbon sink in urban and rural green space mainly focus on the measurement and evaluation of carbon sink, the exploration of carbon sink response mechanism and the optimization practice of green space. Specifically, in terms of the measurement and evaluation of carbon sink, both domestic and foreign researches focus on the accurate measurement of carbon sink in small-scale green spaces such as parks, and the rapid measurement and monitoring of carbon sink in green spaces at or above regional scale. In terms of the response mechanism of carbon sink, both domestic and foreign researches focus on the simulation of carbon cycle process, the evaluation of carbon sink cycle research, and the identification of the driving factors and driving mechanism for carbon sink. In terms of the optimization practice of urban and rural green space, the assessment of carbon footprint in the whole life cycle of green space and the simulation and prediction of carbon sink under different scenarios are research hotspots at present. Domestic and foreign researches follow the same trend in relevant theories, research objects, research contents and measurement and monitoring methods. Specifically, with the expansion of relevant theoretical researches from connotation to extension, the connotations of carbon cycle theory, low-carbon economy theory, carbon footprint theory and other relevant theories have been constantly expanded and gradually penetrated into economic, social and other fields. Research objects have changed from elements to systems, that is, from vegetation, soil and other elements in green spaces to urban and rural green spaces differing in category,

scale, ecosystem type and structural level. Research contents and methods tend to be coordinated and improved in multiple fields. On one hand, improving the capacity of carbon sink and coping with climate change are the consistent themes of domestic and foreign researches; on the other hand, the research scope has been expanded from the initial measurement and monitoring of carbon sink to the response mechanism and optimization approach of carbon sink that involve the economic, social and other fields. In the early stage of the research on carbon sink in urban and rural green space, domestic and foreign researches on green space elements have made similar progress, but with the further development of research, they gradually focus on different fields. Due to the large differences between domestic and foreign countries in such aspects as the dimension of territorial space, social ideology and development mode, and organization structure for administrative division management, foreign researches pay more attention to the measurement and evaluation of carbon sink for green space elements and the identification of carbon sink response mechanism for individual green space while in China the research on carbon sink urban and rural green space at the macro scale has entered the stage of rapid development since 2010, with a lot of practical exploration in green space planning and design.

[Conclusion] This research summarizes existing research results and divides the research process into four stages: the embryonic stage of the research on carbon sink in urban and rural green space (before 2003), the early stage of carbon sink research focusing on ontology elements of urban and rural green space (2003–2010), the development stage of carbon sink research for low-carbon cities and multi-field collaboration (2010–2020), and the new stage of carbon sink research for carbon peaking and carbon neutrality goals (2020 to present). In view of the goal of carbon neutrality, China should establish a monitoring platform and accounting standard system for carbon sink in urban and rural green space to make extensive, consistent and reliable long-term observation of carbon sink in urban and rural green space to serve systematic research on carbon sink in urban and rural green space. Additionally, it is necessary to further clarify the driving response mechanism of carbon sink in urban and rural green space, to optimize the pattern and improve the resource allocation of urban and rural green space. This research explores a multidisciplinary approach to increasing carbon sink with landscape architecture practice as the starting point, with a view to efficiently and comprehensively improving the comprehensive carbon sink efficiency of urban and rural green space.

Keywords: landscape architecture; urban and rural green space; carbon sink; carbon neutrality; low-carbon city; measurement and monitoring

Authors:

WANG Zhenkun is a master student in the School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University. His research focuses on landscape planning and design.

DONG Xinyue is a master student in the School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University. Her research focuses on landscape planning and design.

SHAO Ming, Ph.D., is a lecturer in the School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University. His research focuses on landscape planning and design, green space ecosystem services, big data analysis.

YAO Peng, Ph.D., is vice dean and a professor in the School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University. His research focuses on landscape planning and design, and ecological environment of urban and rural human settlements.
Corresponding author Email: chinayp815@163.com