

武静, 蒋卓利, 吴晓露. 城市蓝绿空间的碳汇研究热点与趋势分析 [J]. 风景园林, 2022, 29 (12) : 43-49.

城市蓝绿空间的碳汇研究热点与趋势分析

Analysis of Hotspots and Trends in the Research on Carbon Sink of Urban Blue-Green Space

武静 蒋卓利 吴晓露

WU Jing, JIANG Zhuoli, WU Xiaolu

中图分类号: TU984

文献标识码: A

文章编号: 1673-1530(2022)12-0043-07

DOI: 10.14085/j.fjyl.2022.12.0043.07

收稿日期: 2022-06-08

修回日期: 2022-10-08

武静 / 女 / 蒙古族 / 博士 / 武汉大学城市设计学院副院长、教授、博士生导师 / 研究方向为风景园林规划与设计

WU Jing (Mongol), Ph.D., is assistant dean of and a professor and doctoral supervisor in the School of Urban Design, Wuhan University. Her research focuses on landscape planning and design.

蒋卓利 / 女 / 武汉大学城市设计学院在读硕士研究生 / 研究方向为风景园林规划与设计
JIANG Zhuoli is a master student in the School of Urban Design, Wuhan University. Her research focuses on landscape planning and design.

吴晓露 / 女 / 武汉大学城市设计学院在读博士研究生 / 研究方向为风景园林规划与设计
WU Xiaolu is a Ph.D. candidate in the School of Urban Design, Wuhan University. Her research focuses on landscape planning and design.

摘要: 近年来, 城市碳排放问题已成为制约城市可持续发展的关键问题, 而城市蓝绿空间因其具有突出的碳汇潜力与增汇效能, 在城市减排增汇中能发挥重要作用。以 1992—2021 年中国知网与 Web of Science 数据库所收录的期刊文章为数据基础, 以“城市蓝绿空间”和“碳汇”为主题, 运用文献计量软件统计后, 对中外文献中城市蓝绿空间的碳汇研究进展、热点前沿及发展趋势展开深入剖析。结果表明: 1) 中外文献发文量逐步上升, 其中中国科研机构在国际合作网络中表现较为突出; 2) 在城市蓝绿空间的碳汇研究领域, 中文文献研究热点主要包括低碳城市、城市绿地碳汇、碳汇效益, 外文文献研究热点主要包括碳汇量估算、碳汇管理和碳汇影响机制; 3) 中文文献研究侧重理论架构和评估体系的建立, 外文文献研究则更关注方法探索和实操应用, 方法类研究逐渐成为学者们共同关注的重点, 并逐步向动态化且多维度的研究拓展。4) 完善城市蓝绿空间碳汇研究框架, 开展“双碳”目标下生物多样性、人类健康福祉等多维度研究, 统筹开展城市蓝绿空间系统的碳汇研究, 强化城市蓝绿空间碳汇计量、评价及优化模型方法等, 将会成为未来的发展热点。

关键词: 风景园林; 城市蓝绿空间; 碳汇; 碳中和; 文献计量

基金项目: 湖北省青年拔尖人才计划项目 (首批); 2022 年度教育部人文社会科学研究一般项目 (编号 22YJA760086); 湖北省长江国家文化公园建设研究课题 (编号 HCYK2022Y05)

Abstract: In recent years, urban carbon emission has become a key issue restricting the sustainable development of cities. Urban blue-green space plays an important role in carbon emission reduction and carbon sink increase thanks to the outstanding carbon sink potential and sink increase efficiency thereof. Based on the periodical articles included in China National Knowledge Infrastructure (CNKI) and Web of Science databases during the period from 1992 to 2021, this research conducts necessary statistics using bibliometric software and, in the theme of “urban blue-green space” and “carbon sink”, analyzes the current status of and hotspots and trends in the research on carbon sink of urban blue-green space reflected in both Chinese and foreign-language literature. The results show that: 1) The number of articles published in Chinese and foreign language achieves a gradual increase, with Chinese research institutions performing more prominently in international cooperation networks; 2) in the field of carbon sink research in urban blue-green spaces, the hotspots of researches in Chinese literature mainly include low-carbon cities, carbon sinks in urban green spaces and carbon sink benefits, while the hotspots of researches in foreign literature mainly include carbon sink estimation, carbon sink management and carbon sink impact mechanisms; 3) researches in Chinese literature focus on theoretical structures and the establishment of evaluation systems, while researches in foreign-language literature is more concerned with methodological exploration and practical application; 4) improving the research framework on carbon sinks in urban blue-green space, carrying out multi-dimensional research on biodiversity and human health and well-being under the carbon peaking and carbon neutrality goals, carrying out integrated research on carbon sinks in urban blue-green space systems, and strengthening the methods for measuring, evaluating and optimizing carbon sinks in urban blue-green spaces will become hotspots for future development.

Keywords: landscape architecture; urban blue-green space; carbon sink; carbon neutrality; bibliometric analysis

Fund Items: Hubei Provincial Top Youth Talent Plan Project (first batch); 2022 General Research Project of Humanities and Social Sciences of Ministry of Education in China (No. 22YJA760086); Hubei Provincial Yangtze National Cultural Park Construction Research Project (No. HCYK2022Y05)



21 世纪以来,随着经济快速发展,中国已成为世界上碳排放量最大的国家^[1],2012 年,中国的年碳排放量已超过美国、欧盟国家和英国的总和。2019 年,中国的年碳排放量占全球年碳排放量的 28%^[2-4]。2020 年 9 月,习近平主席在第七十五届联合国大会上提出中国“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”^[5]。事实上,中国城市的碳排量占全国总碳排量的 85%,截至 2020 年 10 月,中国仍有 86.3% 的城市碳排放量在持续增加,城市碳排放问题已成为目前中国亟待解决的重大问题^[6-7]。

1992 年,《联合国气候变化框架公约》(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)首次定义碳汇(carbon sink)^[8]:从大气中清除 CO₂ 的过程、活动或机制,即各种载体(森林、植被、水体、土壤、湿地等)通过其生态原理,吸收、储存和固定 CO₂ 的过程、活动或机制,当其固碳量大于排放量时,该过程称为碳汇^[9-10]。城市蓝绿空间(urban blue-green space, UBGs)是一个由自然和半自然区域组成的战略性生态规划网络,通常包括城市水域和植被,是城市绿地(森林、城市公园、居住区绿地等)和城市水体(河流、湖泊、湿地、小溪等)的统称^[11],为城市范围内提供广泛的生态系统服务^[12-13]。中国自然资源部于 2019 年在《自然资源部关于全面开展国土空间规划工作的通知》(自然资发[2019] 87 号)中提出市级国土空间规划的审查要点中包含“城市开发边界内,城市结构性绿地、水体等开敞空间的控制范围和均衡分布要求”,也从城市规划层面定义了城市蓝绿空间^[14]。近年的研究表明,蓝色空间是巨大碳库,尤其是湿地、河流、湖泊和沼泽等,其中湿地虽仅占全球陆地表面的 5%~8%,但其土壤碳储量占全球陆地土壤碳储量的 20%~30%^[15-16];绿色空间则是碳汇量最大的贡献者^[17],其产生的碳汇可以抵消 28%~37% 的 CO₂ 排放量^[18-19],对实现碳中和具有不可忽视的促进作用。作为城市中稀缺的自然资源,城市蓝绿空间被认为具有突出碳汇潜力,并能增加城市碳汇效能,能在城市碳减排中发挥重要作用^[20]。

综上,城市蓝绿空间对城市增汇减排具有显著现实意义与实践价值,但目前关于城市蓝绿空间的碳汇效能尚待进一步挖掘与研究。目前关于城市蓝绿空间的研究主要以关注其可达性^[21]、公平性^[22]、健康效应^[23]、气候调节能力^[24]为主,聚焦城市蓝绿空间的碳汇效能的研究则较少,且相关研究多将蓝色空间、绿色空间作为独立对象开展研究,缺乏对城市蓝绿空间作为碳汇系统进行综合统筹的研究^[10,25]。因此,尽早探明国内外城市蓝绿空间碳汇研究的现状和局限,提升城市蓝绿空间的增汇减排能力是亟待开展的重要研究问题。笔者系统梳理并总结中外文城市蓝绿空间的碳汇研究在发文量变化、合作网络方面的特征以及研究内容,探讨其研究的热点与趋势,以期对未来中国实现“双碳”目标提供理论支撑和现实依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

笔者选取中国知网(CNKI)与 Web of Science 数据库检索中外文期刊相关文献。中文期刊文献数据来源于文献覆盖率最高的中国知网的《中国学术期刊网络出版总库》,以“城市蓝绿空间”“城市蓝色空间”“城市绿色空间”“城市绿地”和“碳汇”为主题词;以“碳汇”首次被定义的年份作为时间起点,选取“1992—2021 年”为文献发表时间进行初步检索;文献类型限定为“学术期刊”,共检索到 74 篇期刊文献。进一步扩展城市蓝绿空间的典型类型作为替换词,包括“公园”“河流”“湖泊”“湿地”“森林”^[25-27],并增加限定词“城市”进行检索,同时选取“碳汇”研究所主要包含的“固碳”和“碳储存”作为扩展主题词^[28-29],进行精确检索,共检索到 581 篇文献,通过逐条阅读,人工剔除卷首语、新闻报道、会议资讯等不相关条目,最终确定中文文献 373 篇。

外文文献数据来源于 Web of Science 核心数据库,为使研究结果具有可比性,选取与中国知网文献库相同的检索方式,以“urban blue-green space”“urban green space”“urban blue space”和“carbon sink”“carbon

sequestration”“carbon storage”作为主题词,采用与中文文献检索同样的方式拓展代表城市蓝绿空间的关键词“park”“river”“lake”“wetland”“forests”,同样增加限定词“urban”“cities”“city”,文献类型以“article”作为筛选条件,语言仅限英文,文献发表时间选取“1992—2021 年”,共检索到 812 篇文献,对检索结果逐条阅读,整理并删除不相关条目,最终获取外文文献 421 篇。

1.2 研究方法

本研究采用文献计量方法,运用 CiteSpace 5.8 R3 版本软件与文献计量在线分析平台对中外文期刊中关于城市蓝绿空间碳汇研究的文献进行可视化分析^[30],在 CiteSpace 软件中设置时间跨度为 1992—2021 年,主要运用关键词共现、机构共现、关键词聚类及关键词时间线可视化等功能,生成可视化图谱,进而深入发掘中外文文献城市蓝绿空间的碳汇研究概况、研究热点及其发展趋势。

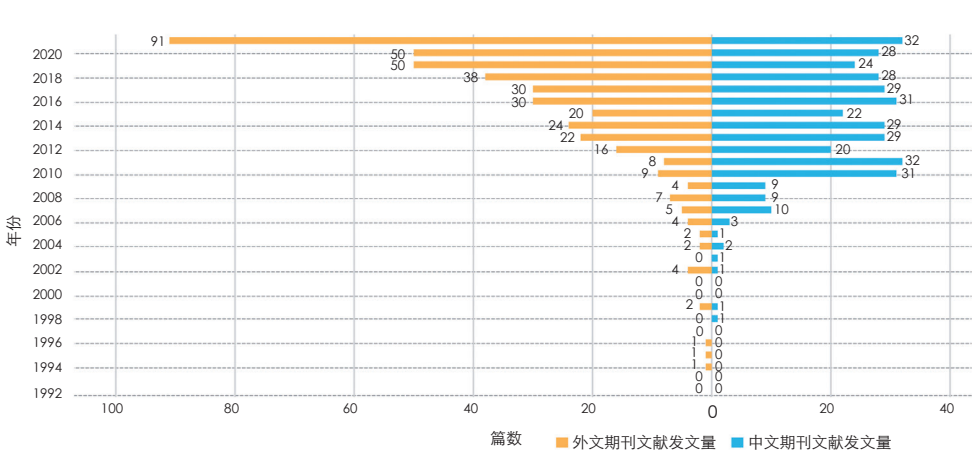
2 研究概况

2.1 发文量逐步增长

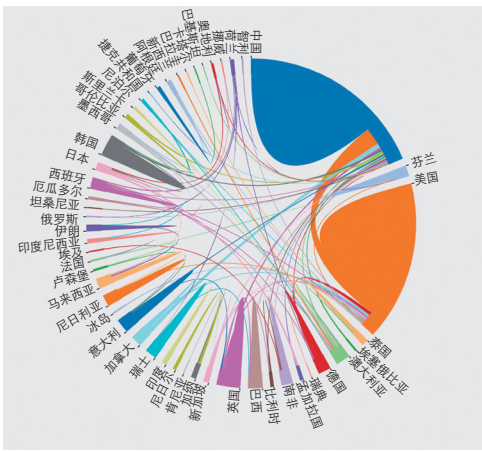
1) 中文文献发文量趋势。1992—2009 年,中文文献中关于城市蓝绿空间碳汇领域的研究逐渐起步,但整体年发文量较低,均在 10 篇以下。2010 年,该领域中文文献的年发文量猛增至 2009 年的 3.4 倍,并于 2011 年达到第一个峰值。2012—2021 年,相关中文文献年发文量呈波动变化,年均发文量 28 篇(图 1)。

2) 外文文献发文量趋势。城市蓝绿空间碳汇研究的外文文献年发文量总体呈现逐年稳定上升的趋势。1992—2011 年,外文文献年发文量逐年递增,但年均发文量仅 2.5 篇。2011—2020 年,该领域年发文量迅速增长,年均发文量为 31 篇,虽然相较 2014 年,2015 年的发文量下降了 16.7%,但 2016 年发文量增至 2015 年的 1.5 倍,反超中文文献 2016 年发文量,2021 年年发文量增至 91 篇,达到了峰值,是中文文献年发文量的 2.8 倍。

总体来看,城市蓝绿空间碳汇研究的中外文文献数量都呈现增长态势,其中外文文献年发文量增长趋势明显且较稳定;中文文献年发文量则呈现前期增长迅猛、后期波动



1 1992—2021 年城市蓝绿空间的碳汇研究发文量对比图（统计时间：2022 年 9 月 20 日）
Comparison of the numbers of published papers regarding the research on carbon sink of urban blue-green space from 1992 to 2021 (statistics time: September 20, 2022)



2 城市蓝绿空间的碳汇研究的国家合作网络图谱（统计时间：2022 年 9 月 20 日）
Map of international cooperation network regarding the research on carbon sink of urban blue-green space (statistics time: September 20, 2022)

变化的状态。

2.2 中国机构在国际合作网络中表现突出

国际层面上，中国在该领域合作网络中表现突出。目前，已逐步形成以中国和美国为核心的国家合作网络（图 2）。在此背景下，中国科学院和美国林业局在国际机构合作网络中占据核心地位，且中国科学院的中心性是美国林业局的 2 倍多（表 1）。其中中国科学院的研究以城市蓝绿空间碳汇的驱动因素为主要议题，美国林业局则重点关注城市森林和植被的碳储量评估、变化及预测。

3 研究热点与趋势

3.1 研究热点分析

从城市蓝绿空间碳汇研究相关文献的关键词共现分析，可以看出该领域的研究热点与前沿^[30]。本研究使用 CiteSpace 软件进行关键词可视化分析，参数选取时间切片长度为 1，以 LLR 算法进行聚类计算，分别获得中英文文献关键词聚类的前 10 位，再对关键词聚类进一步整合，中文文献关键词聚类形成低碳城市、城市绿地碳汇和碳汇效益 3 个热点集群，外文文献关键词聚类形成碳汇量估算、碳汇管理和碳汇影响机制 3 个热点集群（表 2）。

3.1.1 中文文献研究热点分析

1) 低碳城市。在低碳城市相关理念及规划引导下，从城市规划学和风景园林学的

表 1 城市蓝绿空间的碳汇研究发文量前五的科研机构

Tab. 1 Top 5 scientific research institutions in the number of published papers regarding the research on carbon sink of urban blue-green space

中文期刊文献			外文期刊文献		
作者单位	发文量 / 篇	中心性	作者单位	发文量 / 篇	中心性
北京林业大学	20	0	中国科学院 (Chinese Academy of Sciences)	46	0.25
中南林业科技大学	14	0	美国林业局 (United States Forest Service)	18	0.11
东北林业大学	9	0	中国科学院大学 (University of Chinese Academy of Sciences)	18	0.02
浙江农林大学	9	0	佛罗里达大学 (University of Florida)	14	0.03
同济大学	9	0	北京师范大学 (Beijing Normal University)	11	0.09

注：中心性表示整个网络中节点的强度，中心性 > 0.1 意味着该节点在网络关系中较重要。

角度切入，低碳城市热点集群的研究内容以低碳园林营造、低碳环境建设、城市空间布局等低碳城市建设策略与评价的定性研究为主^[31-32]，相对欠缺对实测碳汇效能的定量研究。在研究尺度上，不仅囊括宏观尺度的低碳城市规划，例如城市绿地系统优化^[33]、绿道网络构建^[34]、湿地生态系统调控^[35]等，同时也聚焦于中微观尺度的低碳园林设计，如景观植物配置^[36]和城市开放空间设计^[37]等。

2) 城市绿地碳汇。城市蓝绿空间碳汇的研究对象及涵盖范围主要聚焦于城市绿地和城市森林。城市绿地碳汇的传统估算方法主要有样地勘测法、同化量法、微气象学法等^[38]，随着“3S”技术的不断发展与广泛运用，学者们运用 GIS 技术^[39]与 CITYgreen 模型^[40]、iTree 模型和 InVEST^[38] 模型等构建多样碳汇量

估算方法，进而从绿地空间布局^[41]、绿地系统结构^[42]及绿地植被配置^[43]等方面提出多尺度的优化策略和规划指导方针。

3) 碳汇效益。该热点集群表明城市蓝绿空间碳汇的相关研究多聚焦于城市蓝绿空间增汇减碳、固碳释氧及碳储存等碳汇效益。学者们多运用实地调研法、数学模型预测等方法来量化城市蓝色空间及绿色空间的碳储量，探究其固碳释氧潜力和生态效益评估机制^[35, 44-45]。仅少部分学者关注到城市蓝绿空间耦合效应并开展碳汇相关研究。研究尺度从城市、城市辐射区逐渐扩大到国土尺度^[46-48]，更具有广泛的现实意义。

3.1.2 外文文献研究热点分析

1) 碳汇量估算。随着研究数据和方法日益的多元化和先进化，生态学、资源环境科

表2 中外文文献关键词聚类分类表
Tab. 2 Keywords clustering and classification of Chinese and foreign-language literature

分类	热点集群	聚类名称	S 值
中文文献	低碳城市	低碳	0.937
		低碳园林	0.946
		低碳城市	1.000
	城市绿地	城市绿地	0.974
	碳汇	城市森林	0.817
	碳汇效益	固碳释氧	0.905
		生态效益	0.94
		服务功能	0.985
		碳汇	0.905
		碳储量	1.000
	碳汇量估算	allometric equations	0.898
		microbial communities	0.849
		NPP	0.913
		GIS	0.892
外文文献	碳汇管理	forest management	0.967
		forest carbon sequestration	0.961
	碳汇影响机制	land use	0.849
		carbon sequestration	0.935
		carbon accumulation	0.920
		warming	0.851

注：S 值指聚类平均轮廓值 (silhouette)，一般认为 S>0.5 聚类是合理的，S>0.7 表示聚类则是令人信服的^[30]。

学和城乡规划学等多学科交叉特征显著，探索多样数据和方法来测量生物量并估算城市蓝绿空间的碳汇量成为外文文献的研究热点。学者们多以生物量回归方程结合 iTree 模型^[49]、NPP 数据^[50]、GIS 数据^[51]和地面激光扫描 (terrestrial laser scanning, TLS) 数据^[52]等，从宏观尺度上估算全球、国家及省市等不同范围内的城市蓝绿空间碳储量；从中微观尺度上量化城市蓝绿空间内微生物群落的全生命周期生物量^[53-54]，进而优化城市蓝绿空间布局和指导规划发展方向。

2) 碳汇管理。基于现实需求和政策导向的双重驱动，城市的碳汇管理研究受到广泛关注。通过有效的森林管理是提升森林碳储存的重要手段，学者提出多种管理策略来提高城市森林的碳储量，例如在退化和废弃的土地上植树造林^[55]、促进生物多样性^[56]、构建绿色基础设施设计框架^[57]等。在研究方法上，学者们多通过多源数据的测算开展研

表3 中外文文献前 20 高频关键词及其首次出现年份
Tab. 3 Top 20 high frequency keywords and year of first appearance thereof in Chinese and foreign-language literature

中文文献			外文文献		
关键词	频次	年份	关键词	频次	年份
城市绿地	56	1998	storage	84	1999
城市森林	42	2004	sequestration	84	2002
碳汇	36	2008	forest	77	2002
价值评估	36	2003	impact	63	2007
生态效益	31	2004	bioma	54	2002
固碳释氧	24	2008	tree	53	2006
碳储量	21	2007	carbon storage	50	2011
低碳城市	20	2009	ecosystem service	46	2012
低碳	14	2011	urbanization	45	2012
风景园林	14	2010	vegetation	40	1996
固碳	10	2008	emission	38	2007
低碳园林	9	2011	dynamics	37	2002
城市湿地	7	2010	city	36	2013
绿地	7	2011	stock	35	2007
城市	6	2010	land use	34	1999
园林植物	6	2013	climate change	34	1996
森林	6	2008	management	33	2008
上海	6	2009	biodiversity	30	2005
生态系统	5	2011	area	28	2013
价值	5	2008	ecosystem	23	2008

究，如利用 Landsat 土地利用与土地覆被 (land use and land cover, LULC) 数据^[58]、增量增长 (incremental growth) 估算方法^[59]、Sentinel-2 光谱数据^[60]、森林清单法^[61]和 GIS 数据^[62]等评估碳储量和可视化人工植被的时空分布情况，为制定生态和环境政策从而有效管理城市生态系统的碳储量提供依据。

3) 碳汇影响机制。越来越多的学者们认识到碳封存和碳固定是应对全球气候变暖问题的重要途径。外文文献中，学者们主要围绕土壤碳储存^[63]、生境质量^[64]、城市树种及其生长周期^[65]、生物多样性^[54]等方面，从城乡规划学和生态学的角度，分析土地利用变化、气候变化对城市蓝绿空间碳汇的影响机制。此外，探明城市蓝绿空间的碳储量、生态系统服务的时空异质性等与城市土地利用管理的动态发展关系^[66-67]也是研究重点，这为城市蓝绿空间规划布局向生态可持续的方向发展提供了更科学的依据。

对比中外文文献研究热点发现，城市蓝绿空间碳汇研究多学科交叉特征显著，外文文献研究以城乡规划学、生态学和资源环境科学为主导，中文文献研究主要以风景园林学、城乡规划学和生态学学科为主。中文文献研究侧重于理论架构和评估体系的建立，外文文献研究更致力于方法探索和实操应用，并开展了城市蓝绿空间与碳汇之间动态关系的研究。从研究尺度上来看，中外文文献的相关研究都涵盖了宏观至中微观尺度的研究，中文文献多聚焦于宏观及中小尺度的静态研究，外文文献则更关注宏观及微观尺度的动态研究，但前者在研究维度上有进一步拓展的空间。值得一提的是，城市绿色空间碳汇效能是学者们共同关注的热点，而对城市蓝绿空间系统碳汇的综合研究仍稍显单薄。

3.2 研究趋势分析

对比中外文文献前 20 的高频关键词 (表 3)，可见中外学者以城市森林、植被为研究对象开展了丰富的研究，固碳释氧、碳储存等生态效益也是研究重点，但受国家政策和风景园林学科发展的影响，中文文献中涌现出低碳、低碳城市、低碳园林和风景园林等关键词，并逐渐转向量化价值评估。外文文献则一直侧重于城市化、气候变化、土地利用变化等动态纵向研究，渐渐形成生态学、城乡规划学、资源与环境科学主导的学科格局。从高频关键词首次出现的年份来看，中文文献的高频关键词集中出现在 2008—2011 年，外文文献的高频关键词则集中出现在 2002—2007 年。

3.2.1 中文文献研究趋势分析

1) 演变分析。通过对中文文献关键词时间线图^①进行分析，可以发现，中文文献研究内容始于 1998 年对城市绿色空间碳汇及其生态效益的探讨，紧扣时政热点，呈现先发散后聚焦的势态，研究类型以理论研究为主，定量研究和方法研究也开始萌芽，随着学科的发展，2011 年风景园林学科的主导地位也逐渐显现，但整体研究维度和尺度较为单一。

“城市绿地”作为中文文献的关键词最早出现在 1998 年《广州城市绿地系统碳的贮存、分布及其在碳氧平衡中的作用》中，该

研究首次提出了城市绿地对城市碳氧平衡的作用。此后,中文文献在城市蓝绿空间的碳汇研究领域围绕城市绿色空间初步展开,同时碳汇作为一种生态效应也受到了广泛的关注,出现了“园林绿地”“生态效应”和“城市森林”3个核心关键词,初步形成了城市蓝绿空间碳汇研究的雏形与框架。2007年后,中文文献在该领域的关键词数量呈现爆发式增长,研究方向逐渐分散,关键词由单一化转变为多样化。研究方向逐渐分散,关键词由单一化转变为多样化的发展趋势。2008年,由于中国低碳生活、低碳经济等理念的提出,“低碳城市”“低碳”等关键词陆续涌现,学者们围绕该方向开展了理论型的研究^[68-69]。2011年,风景园林学科被确定为一级学科,至此在城市蓝绿空间碳汇研究领域,风景园林学科地位愈加凸显,中国学者以风景园林学科为主导开展了园林设计、低碳设计等研究^[70-71],随着量化研究的普及,结合计算机科学与技术、生态学等学科,开展了低碳树种选择、城市蓝绿空间碳汇量估算、景观绩效估算、生态系统服务价值评估等定量研究^[44, 48]。研究尺度也渐渐聚焦到中小型蓝绿空间和植被尺度上^[72-73]。2016年后,随着研究的进一步深入,为进一步提升研究结果的准确性,少量学者开始对定量化研究方法、科学化评估模型进行探究^[74-75]。2020年,中国提出“双碳”目标,研究内容重新聚焦,学者们围绕城市蓝绿空间碳汇和城市碳排之间的动态关系开展初步研究,但整体来看长时序的纵向研究仍有待进一步深入。

2) 突变词分析。突变词是指在某一时期使用频次骤增的关键词,表示这个关键词在该时间段受到研究人员的高度重视^[30]。中文文献的突变词有3个,分别是“城市森林”“低碳”和“价值评估”,出现时间间隔6~7年,但热点持续性较好。第一个突变词“城市森林”出现于2004年,持续到2010年,持续时间长,表明在较长一段时间里,中文文献相关研究聚焦在城市森林领域。受国家政策的引导,在2011—2015年,“低碳”受到广泛关注,成为研究焦点。自2017年开始,定量化研究开始起步,对固碳、碳汇的“价

值评估”成为中国学者们关注的前沿问题。

3.2.2 外文文献研究趋势分析

1) 演变分析。对外文文献关键词时间线图谱进行分析发现,外文文献关于城市蓝绿空间碳汇的研究方向丰富,整体聚焦且稳定,在生态学基础上,融入城乡规划学、资源与环境科学的学科知识,开展一系列定量研究和实验研究。随着研究深入和多学科交叉发展,方法类研究渐渐占据主导地位,同时研究尺度也从小尺度和微观尺度扩展到区域宏观层面,并逐步向动态化和多维度的研究转变。

1996年,外文文献研究逐步出现“climate change”“vegetation”这两大关键词,可见,早在1996年气候变化这一国际问题就备受关注,外文文献研究聚焦于城市森林树种、植被碳汇效益在缓解气候变化的作用机制^[76],为城市蓝绿空间碳汇研究发展打下稳定基础;1999—2012年,外文文献开始转向动态化且多维度的研究,在生态学的主导下,持续聚焦于植被、树种、湿地植物等小尺度研究^[7]的同时,也对微生物群落、生物量这类微观尺度^[78-79]开展了定量研究和实验研究,更加全面地探讨碳汇、碳储存、碳固存等生态系统服务过程的动态机制。2005年后,随着计算机科学与技术、城乡规划学、资源与环境科学等学科的融入,一批方法类研究成果涌现,包括生物量计算方法的更新及碳汇模拟模型的建立等^[78, 80-81],为提升研究的准确性和科学性提供了有力的保障。2012年后,“city”“urbanization”等与城市、城市化相关的关键词涌现,可见研究尺度扩展到宏观的区域层面,不少学者围绕宏观尺度的湿地、河流、绿地开展研究,并开始探究城市化对蓝绿空间碳汇的影响机制^[82-84],2016年后,外文文献中城市蓝绿空间碳汇研究领域的研究热点趋于稳定,并延续动态化发展态势,关注城市蓝绿空间格局、碳汇变化趋势等长时序的纵向研究。

2) 突变词分析。外文文献相关研究在过去30年间出现过3个突现词“sequestration”“tree”“water”,且均集中出现在2013—2015年,表明其发展较为稳定。2013年“sequestration”短暂突现,说明捕获、固定

和储存CO₂的生态过程和机制成为关注重点。2015年“tree”和“water”两词同时突现,表示树木植被和各类蓝色空间的碳汇成为研究热点。

综上,中外文文献在城市蓝绿空间碳汇领域的研究趋势存在以下异同:1) 学科发展上,多学科交叉研究已逐渐成为主流,中文文献中风景园林学的地位在该领域愈加重要,外文文献则在生态学的基础上,逐渐融入城乡规划学、资源环境科学的知识;2) 研究类型上,中文文献多以理论研究为主,外文文献则多以实验研究和定量研究为主,但随着研究进展,中外文文献都开始关注应用方法类的研究;3) 研究尺度上,中文文献研究渐渐聚焦于中小尺度的城市蓝绿空间,外文文献研究则一直聚焦于微观生物尺度和宏观区域尺度;4) 研究维度上,中文文献研究多以单一静态研究为主,外文文献则强调多维度动态研究;5) 研究方向上,总体研究方向都呈现多元化、丰富化的发展趋势,但中文文献研究关注点较为分散,外文文献则较为聚焦。

4 结论与展望

1992—2021年,国内外学者在城市蓝绿空间碳汇研究领域开展了多尺度、跨学科的研究,中国科研机构在国际合作网络中担任重要角色,但中文文献在该领域的发文量发展态势较波动,导致整体研究维度较局限且多为静态研究。值得注意的是,城市绿色空间的碳汇研究已成为学者们共同关注的热点,然而统筹开展城市蓝绿空间系统碳汇的综合性研究仍不够深入。整体来看,中文文献研究侧重理论架构和评估体系的建立,外文文献研究则关注方法探索和实操应用,随着研究的深入,优化、构建模型等方法类研究已成为学者们共同关注的重点和难点。

中国目前面临着“碳中和”承诺带来的挑战和机遇,城市蓝绿空间通过发挥其碳汇效益来促进城市增汇减排,进一步为中国实现“双碳”目标提供理论支撑和现实依据,笔者根据相关研究梳理,就中国未来城市蓝绿空间碳汇领域的研究提出以下4个方面的建议。

1) 鼓励跨机构、跨国的交流合作,不断

完善国内城市蓝绿空间碳汇研究框架,形成稳定发展的研究格局,提升中国在城市蓝绿空间的碳汇研究领域的国际影响力。

2) 促进多学科交叉,拓展城市蓝绿空间碳汇研究的维度。结合计算机科学与技术、数学等学科,运用新型的数据获取技术和科学精确的评估方法,实现研究维度由静态向动态的转变,形成纵横结合的研究格局。同时,在风景园林学科的引导下,注重人与自然的的关系,在“双碳”目标下进行生物多样性、人类健康福祉等微观尺度研究也是未来的热点趋势。

3) 统筹开展城市蓝绿空间系统的碳汇研究。宏观层面上,城市蓝、绿空间不是独立的个体,应该被视为一个不断交织、融合的空间系统,因此借助大数据技术、地理空间系统将海量的城市蓝绿空间信息整合,抽丝剥茧地梳理城市蓝绿空间碳汇的耦合效应和空间特征是未来的一大趋势,这对完善城市蓝绿空间系统的评估与管理具有重要意义。同时,在微观层面上,明确城市蓝绿空间设计中植物、微生物、设施及景观等各要素对增汇减排的效应也是未来的热点之一。

4) 强化城市蓝绿空间碳汇计量、评价及优化模型方法的研究,指导城市蓝绿空间系统规划碳汇效益的提升。目前,由于受到遥感数据精度低、大面积清查困难以及生态过程复杂等问题的制约,城市蓝绿空间碳汇计量难以精细化发展,因此探明城市蓝绿空间碳汇量的影响因素及其影响机制,包括单株植物层面、植物群落层面、蓝绿空间布局及结构层面、其他环境层面,构架多尺度、高精度的碳汇计量、评价及优化模型是未来该领域的研究重点,能为进一步制定和优化城市蓝绿空间增汇减排方案提供科学的方法支撑。

注释 (Note):

① 读者可以扫描 OSID 码查阅中外文献关键词时间线图。

参考文献 (References):

[1] ZHENG X Q, LU Y L, YUAN J J, et al. Drivers of Change

in China's Energy-Related CO₂ Emissions[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(1): 29-36.

[2] TOLLEFSON J. Can The World Slow Global Warming?[J]. Nature, 2019, 573(7774): 324.

[3] DUAN H B, ZHOU S, JIANG K J, et al. Assessing China's Efforts to Pursue the 1.5 Degrees C Warming Limit[J]. Science, 2021, 372(6540): 378-385.

[4] LIU Z, DENG Z, HE G, et al. Challenges and Opportunities for Carbon Neutrality in China[J]. Nature Reviews Earth and Environment, 2021, 3(2): 141-155.

[5] 新华社·习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话(全文)[EB/OL]. (2020-09-22)[2022-10-06]. http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-09/22/c_1126527652.htm.

[6] XUE B, REN W X. China's Uncertain CO₂ Emissions[J]. Nature Climate Change, 2012, 2(11): 762.

[7] CO₂ Emissions Reductions in China, 2015—2060 by Scenario-Charts-Data & Statistics-IEA[EB/OL]. (2022-05-24)[2022-06-02]. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/co2-emissions-reductions-in-china-2015-2060-by-scenario>.

[8] UNFCCC. What is the United Nations Framework Convention on Climate Change[EB/OL]. (1994-05-21)[2022-09-30]. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-convention/what-is-the-united-nations-framework-convention-on-climate-change>.

[9] 朴世龙, 岳超, 丁金枝, 等. 试论陆地生态系统碳汇在“碳中和”目标中的作用[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(7): 1419-1426.

[10] 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.

[11] 杜红玉. 特大型城市“蓝绿空间”冷岛效应及其影响因素研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2018.

[12] VEERKAMP C J, SCHIPPER A M, HEDLUND K, et al. A Review of Studies Assessing Ecosystem Services Provided by Urban Green and Blue Infrastructure[J]. Ecosystem Services, 2021, 52: 101367.

[13] YANG G Y, YU Z W, JORGENSEN G, et al. How Can Urban Blue-Green Space Be Planned for Climate Adaption in High-Latitude Cities? A Seasonal Perspective[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 53: 101932.

[14] 中华人民共和国中央人民政府. 自然资源部关于全面开展国土空间规划工作的通知[EB/OL]. (2019-06-02)[2019-05-28]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2019-10/14/content_5439428.htm.

[15] 杨元合, 石岳, 孙文娟, 等. 中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献[J]. 中国科学: 生命科学, 2022, 52(4): 534-574.

[16] MITSCH W J, BERNAL B, NAHLIK A M, et al. Wetlands, Carbon, and Climate Change[J]. Landscape Ecology, 2013, 28: 583-597.

[17] PIAO S L, FANG J Y, CIAIS P, et al. The Carbon Balance of Terrestrial Ecosystems in China[J]. Nature, 2009, 458(7241): 1009-1082.

[18] HU H F, WANG S P, GUO Z D, et al. The Stage-Classified Matrix Models Project a Significant Increase in Biomass Carbon Stocks in China's Forests Between 2005 and 2050[J]. Scientific Reports, 2015, 5(1): 11203.

[19] ZHANG H Y, FENG Z K, CHEN P P, et al. Development of a Tree Growth Difference Equation and Its Application in Forecasting the Biomass Carbon Stocks of Chinese Forests in 2050[J]. Forests, 2019, 10(7): 582.

[20] BOYD P W, CLAUSTRE H, LEVY M, et al. Multifaceted Particle Pumps Drive Carbon Sequestration in the Ocean[J]. Nature, 2019, 568(7752): 327-335.

[21] GUO S H, SONG C, PEI T, et al. Accessibility to Urban Parks for Elderly Residents: Perspectives from Mobile Phone Data[J]. Landscape and Urban Planning, 2019, 191: 103642.

[22] WOLCH J R, BYRNE J, NEWELL J P. Urban Green Space, Public Health, and Environmental Justice: The Challenge of Making Cities 'Just Green Enough'[J]. Landscape and Urban Planning, 2014, 125: 234-244.

[23] BRATMAN G N, ANDERSON C B, BERMAN M G, et al. Nature and Mental Health: An Ecosystem Service Perspective[J]. Science Advances, 2019, 5(7): eaax0903.

[24] MASOUDI M, TAN P Y. Multi-year Comparison of the Effects of Spatial Pattern of Urban Green Spaces on Urban Land Surface Temperature[J]. Landscape and Urban Planning, 2019, 184: 44-58.

[25] 黄铎, 易芳蓉, 汪思哲, 等. 国土空间规划中蓝绿空间模式与指标体系研究[J]. 城市规划, 2022, 46(1): 18-31.

[26] HUANG T F, HE Q Y, YANG D X, et al. Evaluating the Impact of Urban Blue Space Accessibility on Housing Price: A Spatial Quantile Regression Approach Applied in Changsha, China[J]. Frontiers in Environmental Science, 2021, 9: 164.

[27] 冷红, 闫天娇, 袁青. 蓝绿空间的心理健康效应研究进展与启示[J]. 国际城市规划, 2022, 37(2): 34-43.

[28] WANG Y F, LIU L, SHANGGUAN Z P. Carbon Storage and Carbon Sequestration Potential Under the Grain for Green Program in Henan Province, China[J]. Ecological Engineering, 2017, 100: 147-156.

[29] GORTE R W. Carbon Sequestration in Forests[M]. Pennsylvania: Diane Publishing, 2009.

[30] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究, 2015, 33(2): 242-253.

[31] 刘骏, 胡剑波, 罗玉兰. 低碳城市测度指标体系构建与实证[J]. 统计与决策, 2015(5): 59-62.

[32] 叶祖达. 建立低碳城市规划工具: 城乡生态绿地空间碳汇功能评估模型[J]. 城市规划, 2011, 35(2): 32-38.

[33] 李信仕, 王诗哲, 石铁矛, 等. 基于低碳城市理念下的绿地系统规划研究策略: 以沈阳市为例[J]. 城市发展研究, 2012, 19(3): 134-136.

[34] 李方正, 肖遥, 李雄. 低碳城市理念在绿道规划中的应用研究: 以迁安市为例[J]. 中国园林, 2015, 31(9): 55-59.

[35] 李海涛, 沈文清, 刘琪璟, 等. 湿地生态系统的碳循环研究进展[J]. 江西科学, 2003(3): 160-167.

[36] 幸宏伟, 秦坤蓉. 低碳植物景观营造探析[J]. 北方园艺, 2013(5): 81-84.

[37] 赵凯茜, 李翅. 能值分析方法在社区环境可持续发展评估中的应用[J/OL]. 国际城市规划, 2022: 1-17 (2022-04-13) [2022-10-17]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=GWCG20220412001&uniplatform=NZKPT&v=Bx dPOPdOwA89157Bsc_eTnMi2wLgB949J87bFVN5Ymp-AQOn25iS8pK6ZlrodD7z.

[38] 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.

[39] 汪洁琼, 郑祺. 城市绿色基础设施空间形态的 GIS 生态服务评价模型[J]. 风景园林, 2015, 22(7): 109-117.

[40] 付晖, 廖建和. 基于 RS 的海口城市绿地及其生态效益演变研究[J]. 热带作物学报, 2016, 37(6): 1199-1205.

[41] 何常清, 叶兴平, 陈燕飞. “量、位、效”分析方法在

城市绿地系统规划中的应用：以苏州独墅湖科教创新区为例[J]. 规划师, 2015, 31 (2) : 80-83.

[42] 李方正, 刘阳, 施瑶, 等. 基于生态系统服务功能模拟演算的绿色空间规划框架：以北京市浅山区为例[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41 (11) : 125-136.

[43] 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.

[44] 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.

[45] 熊文, 孙晓玉, 黄羽. 城市静态小水体生态修复措施与生态服务价值评估研究[J]. 水生态学杂志, 2020, 41 (2) : 29-35.

[46] 石铁矛, 潘续文, 高畅, 等. 城市绿地释氧能力研究[J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2013, 29 (2) : 349-354.

[47] 段晓男, 王效科, 逯非, 等. 中国湿地生态系统固碳现状和潜力[J]. 生态学报, 2008 (2) : 463-469.

[48] 王凤珍, 周志翔, 郑志明. 城郊过渡带湖泊湿地生态服务功能价值评估：以武汉市严东湖为例[J]. 生态学报, 2011, 31 (7) : 1946-1954.

[49] NYELELE C, KROLL C N, NOWAK D J. Present and Future Ecosystem Services of Trees in the Bronx, NY[J]. Urban Forestry and Urban Greening, 2019, 42: 10-20.

[50] MNGADI M, ODINDI J, MUTANGA O, et al. Estimating Aboveground Net Primary Productivity of Reforested Trees in an Urban Landscape Using Biophysical Variables and Remotely Sensed Data[J]. Science of the Total Environment, 2022, 802: 149958.

[51] LEE J, KO Y, MCPHERSON E G. The Feasibility of Remotely Sensed Data to Estimate Urban Tree Dimensions and Biomass[J]. Urban Forestry and Urban Greening, 2016, 16: 208-220.

[52] KUKENBRINK D, GARDI O, MORSDORF F, et al. Above-Ground Biomass References for Urban Trees from Terrestrial Laser Scanning Data[J]. Annals of Botany, 2021, 128(6): 709-724.

[53] DAHLHAUSEN J, BIBER P, ROTZER T, et al. Tree Species and Their Space Requirements in Six Urban Environments Worldwide[J]. Forests, 2016, 7(6): 111.

[54] MELISSA M R, HALL S J, MAJUMDAR A, et al. Carbon Lost and Carbon Gained: A Study of Vegetation and Carbon Trade-offs Among Diverse Land Uses in Phoenix, Arizona[J]. Ecological Applications, 2017, 27(2): 644-661.

[55] SNEHLATA, RAJLAXMI A, KUMAR M. Urban Tree Carbon Density and CO₂ Equivalent of National Zoological Park, Delhi[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2021, 193(12): 841.

[56] SADAT M, ZOGHI M, MALEKMOHAMMADI B. Spatiotemporal Modeling of Urban Land Cover Changes and Carbon Storage Ecosystem Services: Case Study in Qaem Shahr County, Iran[J]. Environment Development and Sustainability, 2020, 22(8): 8135-8158.

[57] PATAKI D E, CARREIRO M M, CHERRIER J, et al. Coupling Biogeochemical Cycles in Urban Environments: Ecosystem Services, Green Solutions, and Misconceptions[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2011, 9(1): 27-36.

[58] HOQUE M Z, CUI S, ISLAM I, et al. Dynamics of Plantation Forest Development and Ecosystem Carbon Storage Change in Coastal Bangladesh[J]. Ecological Indicators, 2021, 130: 107954.

[59] GU X, ZHAO H, PENG C, et al. The Mangrove Blue Carbon Sink Potential: Evidence from Three Net Primary Production Assessment Methods[J]. Forest Ecology and Management, 2022, 504: 119848.

[60] MNGADI M, ODINDI J, MUTANGA O. The Utility of Sentinel-2 Spectral Data in Quantifying Above-Ground Carbon Stock in an Urban Reforested Landscape[J]. Remote Sensing, 2021, 13(21): 4281.

[61] WOODBURY P B, SMITH J E, HEATH L S. Carbon Sequestration in the US Forest Sector from 1990 to 2010[J]. Forest Ecology and Management, 2007, 241(1-3): 14-27.

[62] BARÓ F, CHAPARRO L, GÓMEZ-BAGGETHUN E, et al. Contribution of Ecosystem Services to Air Quality and Climate Change Mitigation Policies: The Case of Urban Forests in Barcelona, Spain[J]. Ambio, 2014, 43(4): 466-479.

[63] CHIEN S C, KRUMINS J A. Natural Versus Urban Global Soil Organic Carbon Stocks: A meta-Analysis[J]. Science of the Total Environment, 2022, 807(3): 150999.

[64] YANG Y, LI M W, FENG X M, et al. Spatiotemporal Variation of Essential Ecosystem Services and Their Trade-off/Synergy Along with Rapid Urbanization in the Lower Pearl River Basin, China[J]. Ecological Indicators, 2021, 133: 108439.

[65] FRANCINI G, HUI N, JUMPPONEN A, et al. Vegetation Type and Age Matter: How to Optimize the Provision of Ecosystem Services in Urban Parks[J]. Urban Forestry and Urban Greening, 2021, 66: 127392.

[66] XU X B, YANG G S, TAN Y, et al. Impacts of Land Use Changes on Net Ecosystem Production in the Taihu Lake Basin of China from 1985 to 2010[J]. Journal of Geophysical Research-Biogeosciences, 2017, 122(3): 690-707.

[67] RIJAL S, RIMAL B, ACHARYA R P, et al. Land Use/Land Cover Change and Ecosystem Services in the Bagmati River Basin, Nepal[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2021, 193(10): 651.

[68] 徐胜, 陈玮, 何兴元. 城市森林与低碳城市[J]. 科学对社会的影响, 2010 (3) : 14-17.

[69] 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.

[70] 张任菲, 苏俊伊, 杨瑞莹, 等. 低碳园林构建策略探析[J]. 景观设计, 2021 (4) : 16-21.

[71] 李芸, 李静, 张浪. 低碳园林的营建原则与方法[J]. 安徽农业科学, 2011, 39 (17) : 10524-10525.

[72] 饶显龙, 王丹, 吴仁武, 等. 杭州西湖公园 6 种木兰科植物固碳释氧能力[J]. 福建林业科技, 2014, 41 (3) : 1-5.

[73] 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.

[74] 李怒云, 郑小贤, 李金良, 等. 碳汇城市评价指标体系研究[J]. 林业资源管理, 2016 (4) : 1-4.

[75] 韩玉洁, 孙文, 张文文. 基于分布式测算方法的上海城市森林生态系统服务功能评估[J]. 华东师范大学学报 (自然科学版), 2019 (2) : 147-155.

[76] FREEDMAN B, LOVE S, ONEIL B. Tree Species Composition, Structure, and Carbon Storage in Stands of Urban Forest of Varying Character in Halifax, Nova Scotia[J]. Canadian Field-Naturalist, 1996, 110(4): 675-682.

[77] TURNER K, LEFLER L, FREEDMAN B. Plant Communities of Selected Urbanized Areas of Halifax, Nova Scotia, Canada[J]. Landscape and Urban Planning, 2005, 71(2-4): 191-206.

[78] ROKITYANSKIY D, BENIEZ P, KRAXNER F, et al. Geographically Explicit Global Modeling of Land-Use Change,

Carbon Sequestration, and Biomass Supply[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2007, 74(7): 1057-1082.

[79] GONZALEZ-ALCARAZ M, EGEA C, JIMENEZ-CARCELES F, et al. Storage of Organic Carbon, Nitrogen and Phosphorus in the Soil-Plant System of Phragmites Australis Stands from a Eutrophicated Mediterranean Salt Marsh[J]. Geoderma, 2012(185): 61-72.

[80] MILESI C, RUNNING S, ELVIDGE C, et al. Mapping and Modeling the Biogeochemical Cycling of Turf Grasses in the United States[J]. Environmental Management, 2005, 36(3): 426-438.

[81] STROHBACH M, 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.

[82] RACITI S, HUTYRA L, NEWELL J. Mapping Carbon Storage in Urban Trees with Multi-source Remote Sensing Data: Relationships Between Biomass, Land Use, and Demographics in Boston Neighborhoods[J]. Science of the Total Environment, 2014, 500: 72-83.

[83] ZHANG D, ZHENG H, REN Z, et al. Effects of Forest Type and Urbanization on Carbon Storage of Urban Forests in Changchun, Northeast China[J]. Chinese Geographical Science, 2015, 25(2): 147-158.

[84] AI J, SUN X, FENG L, et al. Analyzing the Spatial Patterns and Drivers of Ecosystem Services in Rapidly Urbanizing Taihu Lake Basin of China[J]. Frontiers of Earth Science, 2015, 9(3): 531-545.

图表来源 (Sources of Figures and Tables):

所有图表均由作者绘制，其中图 2 由文献计量在线分析平台生成。

(编辑 / 刘昱霏)