

基于文献计量分析的城市蓝绿空间生态效益研究综述与展望

Progress and Review of Research on Urban Blue-Green Space Based on Bibliometric Analysis

袁旻洋* 张佳琦 汤思琪 郭 蔚
YUAN Yangyang* ZHANG Jiaqi TANG Siqi GUO Wei

(东南大学建筑学院, 江苏省城乡与景观数字技术工程中心, 南京 210096)
(School of architecture, Southeast University, Jiangsu Provincial Urban and Rural Digital Technology Engineering Center, Nanjing, Jiangsu, China, 210096)

文章编号: 1000-0283(2023)04-0059-09
DOI: 10. 12193 /j. laing. 2023. 04. 0059. 008
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2022-09-22
修回日期: 2022-12-13

摘 要
城市中的蓝色空间与绿色空间具有相似的自然生态属性, 在生态功能效益等方面联系紧密、相互影响, 是人居环境重要的研究对象。以往的城市建设中, 绿色与蓝色空间各成体系, 制约了蓝绿空间的生态效益发挥。在公园城市建设与城市高质量发展背景下, “蓝绿融合发展”成为探索城市可持续发展新模式的重要课题。在厘清城市绿色空间、蓝色空间与蓝绿空间概念的基础上, 采用文献计量方法, 运用CiteSpace可视化分析软件, 对2000-2021年三者中英文文献的发文量变化、主要研究方向及研究热点迁移进行了定量分析、定性归纳与比较, 梳理了蓝绿空间生态效益研究的发展脉络, 并针对雨洪管理、降温效应、碳汇效益三个方向的研究进展进行了探讨。结果表明, 城市蓝绿空间的研究起步较晚, 但城市绿色、蓝色空间相关的研究为其提供了一定基础。近年的研究已由单一城市绿色、蓝色空间逐步转向蓝绿空间整体生态效益。日后可围绕蓝绿空间生态效益协同机制、耦合评价体系构建、生态绩效评估等方面开展进一步研究, 并在蓝绿空间规划方法、定量化分析评价技术、蓝绿空间融合模式等方面结合实践进行深入探索。

关键词
城市蓝绿空间; 文献计量分析; 生态效益; 雨洪管理; 降温效应; 碳汇效益

Abstract
The blue and green spaces in cities have similar natural attributes, especially regarding ecological values, which are closely related and interact. They are essential research objects of human settlements. In the past urban construction, green and blue spaces formed a separate system, restricting the overall function and value of blue and green spaces. Under the background of park city construction and high-quality urban development, “blue-green integration development” has become an important topic to explore a new sustainable urban development model. Based on clarifying the concepts of urban green space, blue space, and blue-green space, this paper used the bibliometric analysis method and CiteSpace software to conduct quantitative analysis, qualitative induction, and comparison of the changes in the number of Chinese and English documents issued, the main research directions and the migration of research hotspots between 2000 and 2021 and combs the development of the ecological values of blue-green space. The research progress of 3 hotspots, namely, stormwater management, cooling effect, and carbon sequestration, are discussed. The results show that the research on urban blue-green space started late, but the research on urban green and blue space provides a basis for it. In recent years, research has gradually shifted from unilateral urban green and blue spaces to studying the overall ecological values of blue-green spaces. In the future, further analysis can be carried out on the synergy mechanism of environmental values of blue-green space, the construction of a coupling evaluation system, and environmental performance evaluation, and in-depth exploration can be carried out in combination with practice in blue-green space planning methods, quantitative analysis and assessment techniques, and blue-green space integration models.

Keywords
urban blue-green space; bibliometric analysis; ecological value; stormwater management; cooling effect; carbon sequestration

袁旻洋
1987年/女/江苏南京人/博士/副教授、硕士生导师/研究方向为风景园林规划设计及理论、数字景观技术、城市蓝绿空间规划

张佳琦
1999年/女/山西晋中人/在读硕士研究生/研究方向为园林规划与设计

汤思琪
1999年/女/安徽宿州人/在读硕士研究生/研究方向为园林规划与设计

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

基金项目:
国家自然科学基金重点项目“低影响开发下的城市绿地规划理论与方法”(编号: 51838003)

城市蓝绿空间 (urban blue-green space) 由城市中蓝色空间与绿色空间共同构成, 是城市的生态本底, 在消减城市旱涝、维持生物多样性、减缓城市热岛等多方面发挥了重要的生态服务作用^[1]。随着城市建设发展, 蓝绿空间被逐步侵蚀、割裂, 不仅自我调节功能降低, 而且生态服务功能受到了严重制约^[2]。城市的绿色空间一般占建成区面积的30% ~ 38%, 蓝色空间的面积占比则根据不同城市的自然地理状况各不相同。根据统计, 2018年武汉都市发展区绿色空间占比为35.04%, 蓝色空间为20.09%, 蓝绿空间合计占比55.13%^[3]。在《国务院关于河北雄安新区总体规划(2018-2035年)的批复》中, 提出“将雄安新区蓝绿空间占比稳定在70%……打造蓝绿交织、清新明亮、疏密有度、城淀相映的总体景观风貌。”^[4]由此可见, 蓝绿空间在中国城市建成区中占比高达一半以上, 是人居环境重要的研究对象。

改革开放40年来, 从“园林城市”到“生态园林城市”, 再到当下的“公园城市”, 均强调在尊重生态本底的基础上构建有机的人居环境, 实现生态与形态统一^[5]。当下中国城市发展迈入存量时代, 城市建设工作重心由“增量”转变为“提质”, 在有限空间中蓝绿空间格局的统调与优化显得尤为重要。在国土规划新背景下, “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”成为市级国土空间规划的审查要点^[6]。蓝绿空间编制专项规划已作为重要支撑纳入市县层面国土空间规划体系^[7]。以往的城市规划中, 蓝色空间与绿色空间各成体系。然而, 城市中的蓝绿空间具有相似的自然生态属性, 在空间格局构成、生态功能效益和过程影响等方面联系紧密、相互影响、相互依存, 具有强关联性和整体性, 共

同构成人居环境生态可持续发展的本底。相较于蓝绿分治、各自做功, 将蓝绿空间有机融合、重塑生态关联可以通过“整体大于部分之和”发挥两者的协同效应。“蓝绿融合发展”成为探索城市可持续发展新模式的重要课题。

文章采用文献计量方法, 运用可视化分析软件对2000-2021年的国内外城市绿色空间、城市蓝色空间与城市蓝绿空间研究文献进行统计与梳理, 基于发文量变化、主要研究方向及研究热点迁移分析了研究现状, 梳理了蓝绿空间生态效益研究的发展脉络, 并针对雨洪管理、降温效应、碳汇效益三个热点的研究进展进行了探讨, 旨在为城市蓝绿空间及其融合发展的研究与实践提供参考。

1 研究对象与方法

1.1 城市蓝绿空间及其内涵

城市绿色空间 (urban green space) 的概念最初由城市开敞空间 (urban open space) 演变而来^[8]。日本将城市开敞空间分为公共开敞空间和私有开敞空间, 其中公共开敞空间主要承担城市内建设、发展、游憩等需求^[9]。美国学者则认为, 在城市区域内长时间存在、环境质量较好的区域或者得到一定生态修复的区域为城市绿色空间, 主要包括城市生态保护地域、自然风景区、游憩娱乐用地和为城市扩张建设利用的绿地等^[10]。各国对绿色空间的概念各有侧重, 但均强调城市绿色空间的生态属性和开放性特点。《风景园林基本术语标准》(CJJT91-2017) 中将“城市绿地”定义为: 广义的城市绿地, 指城市规划区范围内的各种绿地, 包括公园绿地、生产绿地、防护绿地、附属绿地和其他绿地, 但不包括屋顶绿化、垂直绿化、阳台绿化和室内绿化, 以物质生产为主的林地、耕地、牧草

地、果园和竹园等地, 以及城市规划中不列入“绿地”的水域。从功能的角度上看, 未被纳入“城市绿地”的屋顶绿化、垂直绿化等立体绿化及林地、耕地等用地, 能够在城市雨洪管理、低影响开发与降温增湿等方面发挥一定的作用, 应当属于绿色空间的研究范畴。

城市蓝色空间 (urban blue space) 由城市中河流、水库、湖泊、沼泽、滩地、池塘等地表水体及湿地所构成, 涵盖了水体及其蓝线控制范围以内的空间^[11]。当代的城市蓝色空间受到城市化的影响, 在某种程度上还具有城市开放空间的功能, 也可以被视作城市滨水空间 (urban waterfront space) 的延伸。城市蓝色空间的主体包括了蓝色斑块与廊道构成的复杂网络体系, 另外还涉及水体临近开放空间, 承担了生态服务及休闲游憩功能。

城市的蓝色与绿色空间在空间中彼此交织, 共同参与城市物质循环与能量流动, 也承担着服务人群休闲、文化活动功能^[12]。从要素层面来看, 城市蓝绿空间是城市绿色空间与蓝色空间的总和, 对于蓝绿空间的研究包括了两者关联性的构建及耦合度的提高; 从系统层面而言, 城市蓝绿空间不囿于两类空间的集合, 而更关注于蓝、绿作为一个整体的协同, 发挥“1+1>2”的系统性作用, 共同承担城市职能、提升生态效益。本文认为城市蓝绿空间是指由“城市绿色空间”和“城市蓝色空间”共同组成的城市生态本底, 不仅包括了绿色空间与蓝色空间物质上的总和, 也包括二者间物质交换、能量流动等自然过程以及相互耦合效应, 具有自然、经济与文化等多种效益^[13]。随着城市发展建设进入提质阶段, 城市蓝绿空间的格局优化与功能协同成为当下关注的热点, 需要在国土空间规划的语境下建立系统化、网络化的整体

蓝绿空间格局。

1.2 文献来源及分析方法

本文的数据来源于中国知网 (CNKI) 和 Web Of Science (WoS) 数据库, 以国内外关于城市绿色空间、蓝色空间以及城市蓝绿空间的文献进行统计与分析, 文献来源为期刊 (Journal), 时间跨度为2000-2021年。在中国知网以“城市绿色空间”“城市绿色系统”“城市绿地”为检索主题词, 共检索出5 849篇文献; 以“城市蓝色空间”“城市蓝色系统”“城市水体”为检索主题词, 共检索出1 883篇文献; 以“城市蓝绿空间”“城市蓝绿系统”“城市蓝绿基础设施”为检索主题词, 共检索出263篇文献。在WoS核心数据库中以“Urban Green Space”“Urban Green System”“Urban Open Space”“Urban Green Infrastructure”为检索主题词, 共检索出19 321篇文献; 以“Urban Blue Space”“Urban Blue System”“Urban Water Bodies”“Urban Blue Infrastructure”为检索主题词, 共检索出8 511篇文献; 以“Urban Blue-Green Space”“Urban Blue-Green Infrastructure”“Urban Blue-Green System”为检索主题词, 共得到242篇文献。

在获取文献数据的基础上, 本文采用 CiteSpace 计量分析软件进行分析, 识别国内外城市绿色空间、城市蓝色空间与城市蓝绿空间研究的发文量、主要研究内容及总体研究趋势, 基于定量分析运用归纳分析法梳理、归纳城市蓝绿空间生态效益的研究发展脉络与主要方向。

2 研究现状概述

2.1 中文文献情况

2.1.1 文献发表量分析

根据2000-2021年关于城市绿色空间、

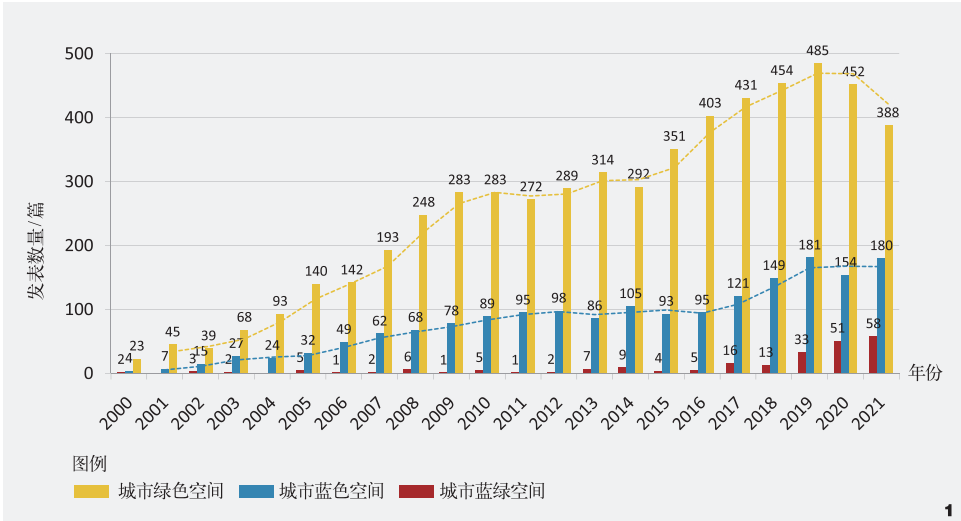


图1 中文文献发表量统计
Fig. 1 Statistics of published Chinese documents

城市蓝色空间、城市蓝绿空间的中文文献发表数量统计图 (图1), 城市绿色空间的研究起步最早、发表量最多, 从2000年之后直至2019年保持上升趋势。尤其是在2014年之后, 发表量增长率较高, 在2019年达到峰值, 但之后开始逐年减少。城市蓝色空间的研究相较于城市绿色空间而言总体发文量偏少, 在2004年之后开始呈现上升趋势, 2016-2019年增长较快。对于城市蓝绿空间而言, 2016年以前论文年发表量均少于10篇, 在此之后呈现逐年上升趋势。对比三者文献发表量与发展趋势可知, 城市绿色空间与城市蓝色空间的相关研究起步较早, 而城市蓝绿空间的研究起步较晚, 但自2019年起有了较快增长。说明随着公园城市建设的开展, 城市蓝绿空间引起了越来越多国内学者的关注, 成为新的研究重点。

2.1.2 主要研究方向

采用CiteSpace软件进行关键词共现分析 (图2), 可结合时间轴判断研究方向的发展

与迁移。城市绿色空间的研究集中于规划设计、生态服务效益、社会服务效益、评价体系等方向。其中, 关于“规划设计”的研究起步较早, 在2000年已有城市空间、城市规划、景观设计等内容。而2018年之后, “生态服务效益”成为了新的研究热点, 涵盖了海绵城市、碳汇及碳中和、冷岛效应等。城市蓝色空间的主要研究方向与绿色空间基本一致, 但研究内容较为单一。在生态服务效益研究中, 主要关注海绵城市、降温效益、低碳生态等, 与城市绿色空间具有相似性。对于城市蓝绿空间而言, 多聚焦于规划设计、生态服务效益、评价体系三个研究方向。“规划设计”是最早被关注的方向, 包括了城市演变、空间规划、韧性城市等。在2016年后, 围绕城市蓝绿空间“生态服务效益”的研究显著增多, 海绵城市、低影响开发、降温效益及碳中和都是近年来的研究热点。此外, 对于蓝绿空间的协同发展、价值评估、评估模型也有较多讨论, 且与蓝绿空间生态效益研究联系紧密。

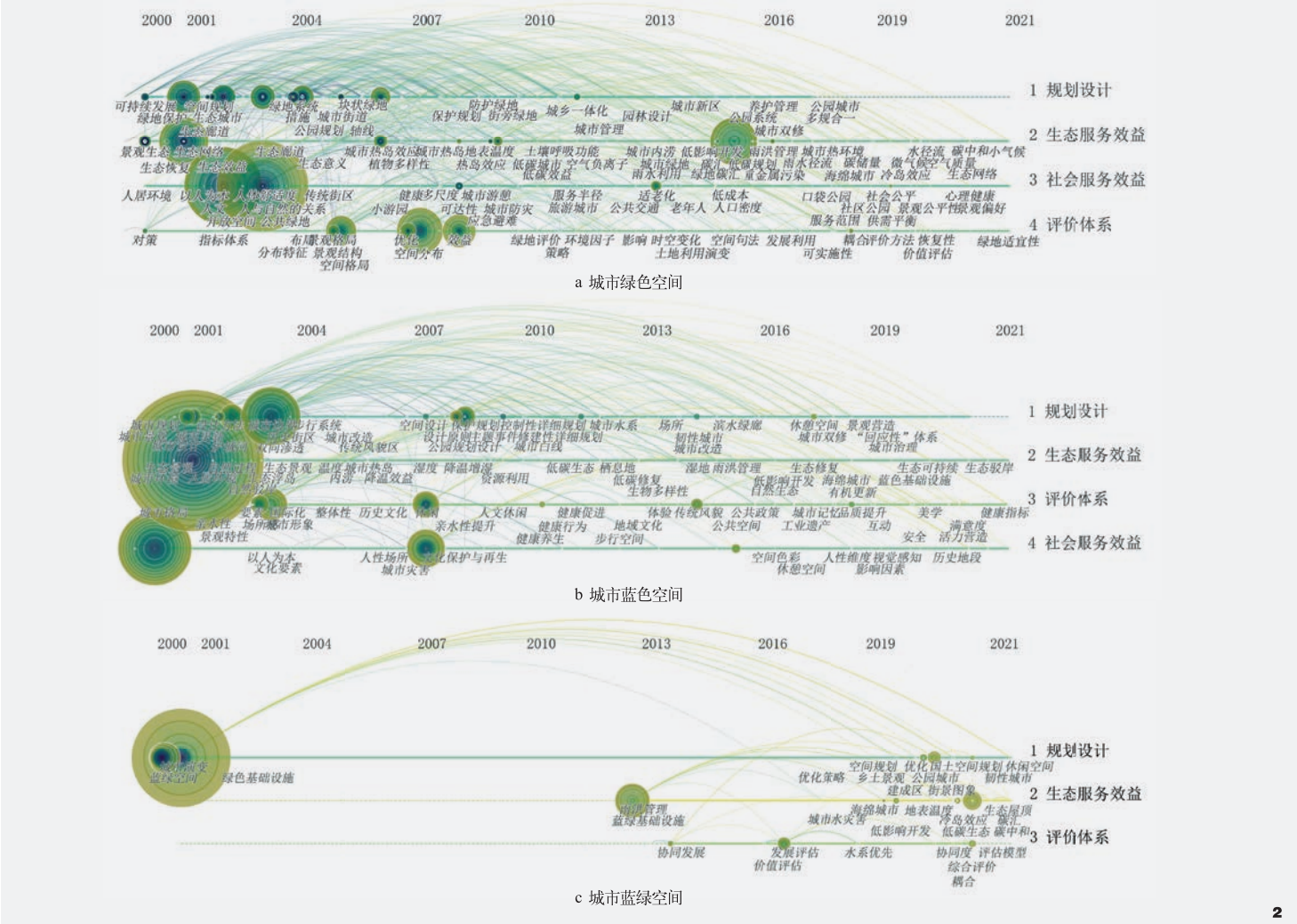


图2 中文文献关键词共现分析图
Fig. 2 Keywords co-occurrence Sequence diagram of Chinese literature

2.2 英文文献情况

2.2.1 文献发表量分析

根据2000-2021年的英文文献年发表数量统计(图3),城市绿色空间研究起步早、发表量多,相关文献年发表量一直呈现上升趋势。2021年共有3 064篇相关文献发表,增长率达到了31%,为历年最高。城市蓝色空间的研究文献量自2000年以来也一直呈现上升趋势,虽然发表量总体小于城市绿色空间,但同样在2021年达到了最高值。2018年

之前,城市蓝绿空间的研究文献年平均发表量均少于10篇,之后才逐渐缓慢上升,在2021年达到74篇。

2.2.2 主要研究方向

从关键词共现分析可看出(图4),城市绿色空间研究内容最为丰富。“规划设计”是2000-2013年间的主要研究方向,2013年后转向了社会服务效益、生态服务效益、评价体系。生态服务效益(ecological value)是城市蓝

色空间研究最早被关注的研究方向,也是近年来的研究热点,包括了雨洪管理(stormwater management)、降温效应(cooling effect)与空气污染(air pollution)。2018年之前,城市蓝绿空间的研究多围绕如可持续(sustainable)、基于自然的解决方案(nature-based solution)、蓝绿基础设施(blue-green infrastructure)等。2018年之后,城市蓝绿空间生态效益的相关研究内容显著增多,聚焦于雨洪管理、降温效益、气候变化(climate change)等。

2.3 研究情况对比分析

根据计量分析，中英文文献中关于城市绿色空间研究均起步较早、内容丰富。虽然城市绿色空间的中文文献发表量在2019年之后呈现下降趋势，但英文文献一直处于上升状态。城市蓝色空间的中英文发表量总体少于绿色空间，但一直呈现上升趋势。对于城市蓝绿空间而言，自2016年开始，中文文献逐步增多，而英文文献在2018年之后才逐步增加。尤其需要关注的是，从文献的作者及机构来看，城市蓝绿空间的英文文献大多由中国学者或者机构发表。由此可知，近年来中国学者由单一城市绿色空间、蓝色空间逐步转向整体视角下城市蓝绿空间的研究。就研究内容而言，城市绿色空间、城市蓝色空间与城市绿色空间具有相似性，集中于“规划设计”“生态效益”“社会服务效益”与“评价体系”4个方向，且生态效益是最早被关注的研究方向，也是近年来的研究热点。通过对比中英文献可看出，城市绿色空间生态效益的研究时间最长，在2000年左右便有大量中英文相关论文发表；城市蓝色空间最初的研究为大尺度的流域水资源保护与利用，研究内容集中于水体的生态服务效益，近年来逐渐转变为蓝色基础设施的生态服务效益研究。城市蓝绿空间生态效益的研究起步较晚，但城市绿色、蓝色空间相关的研究为其提供了一定基础。

3 城市蓝绿空间的研究热点

全球变暖大背景下，气候极端事件频发，严重影响了城市的可持续发展。作为城市生态的本底，蓝绿空间是发挥生态服务效益的主体，对提升城市韧性具有积极的作用。结合前文的定量化分析与定性归纳，城市蓝绿空间生态效益主要研究方向包括“雨洪管

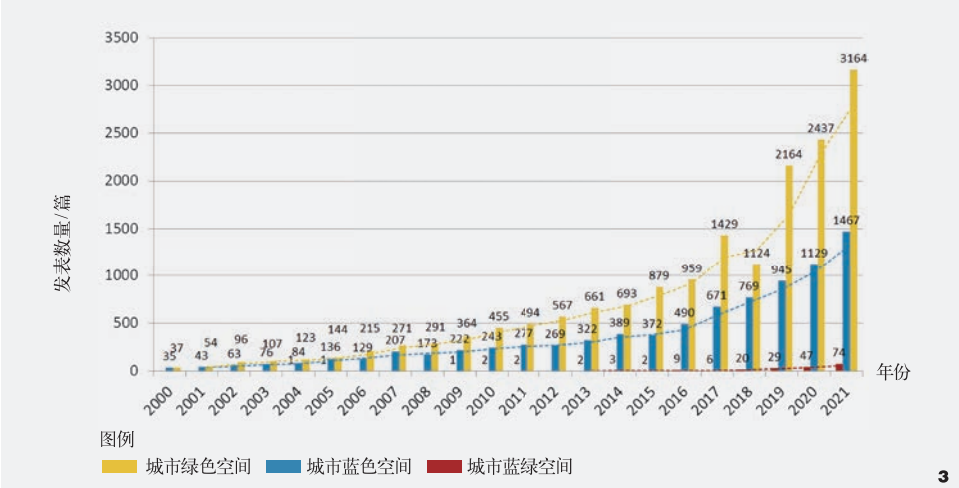


图3 英文文献发表量统计
Fig. 3 Statistics of published English documents

理”“降温效益”“碳汇效益”三个方面，研究的主要类型有：成因、作用机制、管理措施、影响因素等。本文围绕三个研究热点，归纳主要研究内容（表1），并展开详细讨论。

3.1 雨洪管理

在城市快速扩张过程中，蓝绿空间的自然格局被破坏，软质下垫面逐渐被硬质下垫面取代^[14]。城市的雨洪消纳能力降低，在面

临短时强降雨天气时极易产生内涝灾害；同时由于硬质下垫面阻断了雨水径流的下渗，许多城市也出现了地下水位下降的现象^[15]。为解决城市水环境问题，国内外提出了海绵城市、低影响开发、最佳管理实践、水敏型城市设计等理念，蓝绿空间作为城市中“天然的海绵体”对雨洪的收集与再利用等作用越来越受到重视^[16]。

城市绿色空间与蓝色空间的协同作用，

表1 城市蓝绿空间生态效益主要研究内容
Tab. 1 Main research contents of ecological values of urban blue-green space

研究方向 Research directions	类型 Types	研究内容 Research contents
雨洪管理	城市内涝成因	下垫面类型；城市蓝绿空间格局破坏
	管理措施	海绵城市（Spongy City）；低影响开发（Low Impact Development, LID）；最佳管理实践（Best Management Practices, BMPs）；水敏型城市设计（Water Sensitive Urban Design, WSUD）
	雨洪效益的影响因素	土壤特性；植被覆盖；植被类型；城市蓝绿空间面积；城市蓝绿空间格局；场地竖向；气候
降温效益	降温效益作用机制	隔绝辐射；植被蒸腾效益；比热容较大；提升空气对流速率
	降温效益的影响因素	植被类型；城市蓝绿空间形状特征；城市蓝绿空间面积；城市蓝绿空间景观格局；气候；城市蓝绿空间区位
碳汇效益	碳汇途径	植物碳汇；土壤碳汇；水生动植物作用；土壤碳埋藏；水体溶解
	碳汇效益影响因素	植被类型；植被覆盖；土壤类型；城市蓝绿空间格局；气候

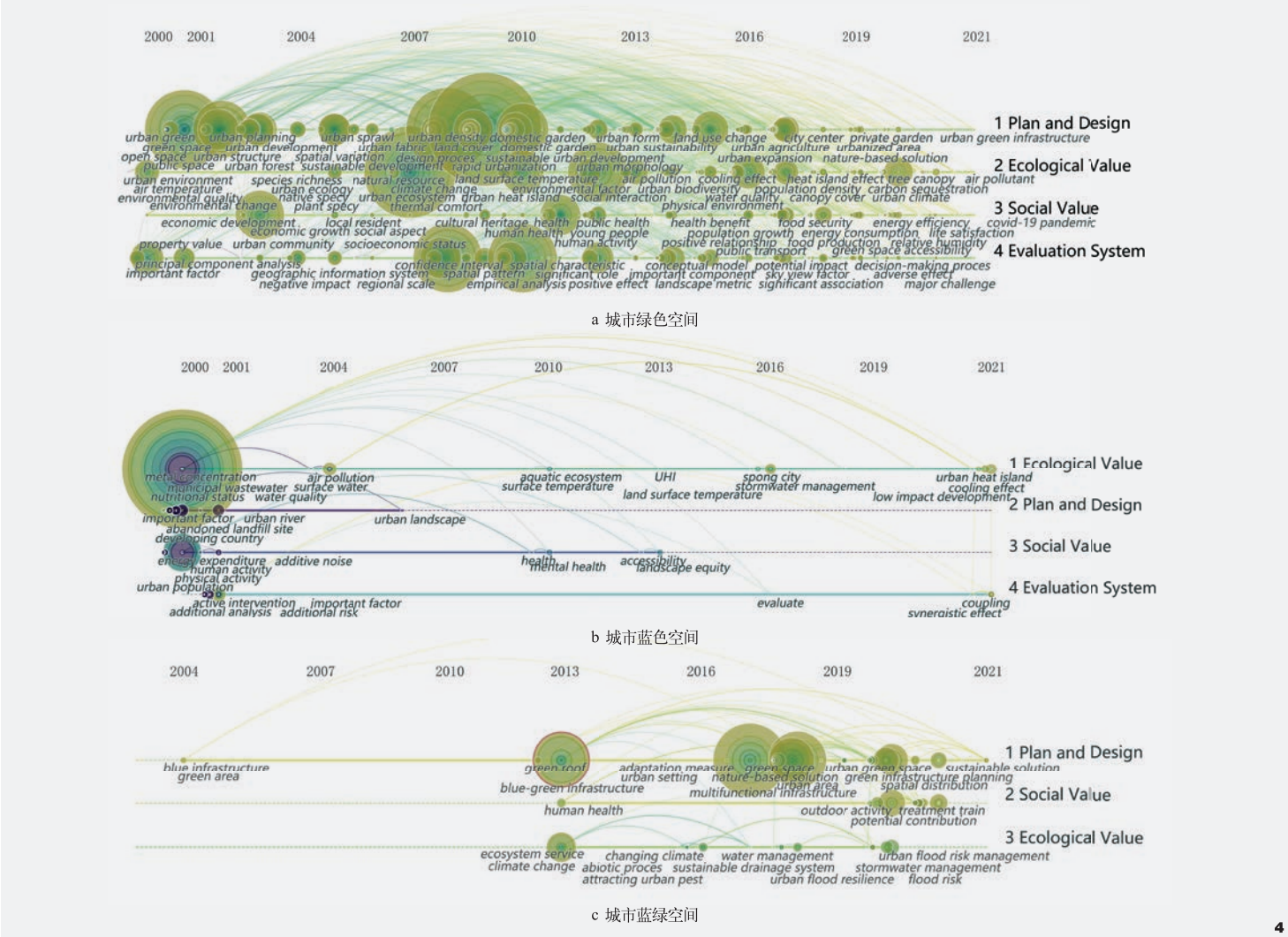


图4 英文文献关键词共现分析图
Fig. 4 Keywords co-occurrence sequence diagram of English literature

提高了城市蓝绿空间对雨洪调蓄功能。以往关于城市绿色空间的植物类型^[17]、植被覆盖^[18]、土壤特性^[19]等绿地要素对于雨洪管理效益的影响有着丰富的研究。近年来，从宏观层面探讨关于城市蓝绿空间格局与雨洪管理的研究较多。有研究表明，良好的城市蓝绿空间格局能够最大程度上优化城市水文过程。如平均斑块分维数对雨洪管理能力有较大影响^[20]；蔓延度（CONTAG）

与区域内涝程度呈正相关关系，景观多样性（SHDI）呈负相关关系，说明城市蓝绿空间形状越复杂、组成类型越丰富，越不易引发区域内涝灾害^[21]；且蓝绿空间密度大的区域，不容易产生内涝^[22]；而聚集程度、连通度不会对城市蓝绿空间产生影响^[23]。金云峰^[23]等学者指出，场地竖向、城市发展空间与城市蓝绿空间交界面的具体情况也会影响其雨洪调蓄能力。

此外，城市蓝绿空间雨洪管理效益也受气候影响^[24]。刘晖、冷红等^[26-27]学者引入“协同度”或“耦合度”的概念，指出尊重城市蓝绿协同规律、构建互馈与动态完善的双向调节机制可以大幅提高城市蓝绿空间的雨洪管理效益。成玉宁等^[28]从低影响开发的角度，从水绿规模、组成结构和空间布局三个层面探讨了“以水定绿”的规划方法，为水绿耦合的城市蓝绿空间规划实践提供了一种途径。

3.2 降温效应

蓝绿空间是城市建成区内唯一的生态冷源，其作用机制主要包括减少太阳热辐射以防止热量聚集、植被隔绝太阳辐射或蒸腾降温、增加下垫面粗糙程度提升空气对流效率^[29-30]。以上作用机制会相互影响，体现了蓝色和绿色空间的协同性，如被树阴遮挡的滨水区域由于隔绝了热辐射，同时水体的高比热容以及粗糙的下垫面使得这类区域的日间热环境较为理想^[31]。从当下的研究来看，形状特征、植被类型与景观格局是影响蓝绿空间降温效应的主要因素，而季节^[32]、区位^[33]等外界因素也会在一定程度上存在影响。

在形状特征方面，城市绿色空间的降温效应与绿地面积、周长都呈现显著正相关关系，但当面积达到一定值时，降温效果变化不明显^[34]，且面积相同的条件下多个小型水体的降温效果强于单一大型水体^[35]。绿地降温效应的强弱也与形状指数、边缘率呈正相关^[36]。Park等^[37]对比了多边形、线形、单一型和混合型绿地的降温效应，指出降温效果最为显著的是多边形与混合型绿地。此外，也有研究表明线状蓝绿空间的降温效应受到宽度的影响，如河流越宽、面积越大，降温效果越显著^[38]，而宽度45 m以上的滨水线状绿地降温效应更好^[39]。在植物类型方面，归一化植被指数、植被覆盖率、植物群落郁闭度、平均冠幅、叶面积指数等均与降温效应呈正相关^[40]。也有定量研究显示，当绿化覆盖率达到30%时热岛效应明显减弱，绿化覆盖率超过50%时降温效应极其明显^[41]。

在城市存量发展时代，城市蓝绿空间布局需要进行精细化调控，利用景观格局指数构建城市蓝绿空间与降温效应之间关联性越来越多地被讨论。Du等^[42]发现最大斑块指数对降温效应有积极作用，即在一定空间尺度

上，规模较大的绿地比破碎化程度高的降温作用更好。在大于0.25 km²的前提下，多块、密集分布的小面积水体对环境的降温效果更为显著^[43]。微型绿地的冷却作用也不可忽视，其影响范围为自身宽度的0.5 ~ 1倍，科学布局和充分利用微型绿地是缓解高密度城市过热问题的有效途径^[44]。此外，苏王新等^[45]的研究表明在街区尺度下，提升蓝绿空间连通性也可以提高其降温效益。

3.3 碳汇效益

温室气体造成的全球气候变暖已成为人类社会可持续发展的阻碍，城市作为碳排放的主要区域^[46]，需要中和碳排放、增加碳汇效益。城市蓝绿空间作为发挥碳汇效益的主要载体，在“双碳”时代是不可替代的战略资源。绿色空间主要通过植物和土壤实现碳汇效益，而蓝色空间的碳汇途径主要为土壤碳埋藏、水生动植物作用、水体溶解^[47-48]。两者除固碳途径不同之外，碳汇效益也存在一定差异。有研究表明城市绿色空间的碳汇效益高于蓝色空间^[49]。

从构成要素方面看，绿色空间中的植物是碳汇的主体，种类、树龄、气候等都会影响其碳汇效益^[50]。群落结构复杂的植被的碳汇能力明显高于单一群落结构，其中乔灌木群落结构碳汇效益最好^[51]。植物的叶密度以及郁闭度等会影响光合作用速率，三维绿量越大，碳汇效益越好^[52]。蓝色空间中的水生植物和湿地植物群落的碳汇效益较好，如互花米草群落、莎草湿地群落等^[53]。城市绿地的土壤碳汇主要是通过地植被的光合作用及土壤的碳蓄积^[54]。不同类型绿地的土壤碳储量不同，其中公园绿地最高、防护绿地最低^[55]。土地类型^[56]、植被覆盖度^[57]、气候条件^[58]、人类活动干扰^[59]均会影响绿地

土壤碳汇效益。有研究认为，城市蓝色空间中的淤泥、湿地等区域的固碳潜力远高于绿色空间^[60]。

从空间格局上看，城市绿地的空间分布特征会影响其碳汇效益，如王敏、朱雯^[47]发现空间分布均衡、网络密度高的城市绿地碳汇效益较强。绿地土壤的碳储量也会随着空间分布而变化；水平层面上，绿地土壤碳储量随着离城市中心距离增加而呈现递减趋势^[61]，而中心城区内部碳储量的空间分布呈中心低、四周高的特点^[62]；垂直层面上，土壤的碳储量会随着土壤深度的增加而减少^[63]。与绿色空间相比，关于城市蓝色空间碳汇空间分布特征的研究较少，现有的研究对象多为大尺度的海洋、湿地海岸带、红树林等^[65]。

4 结论与展望

本文在厘清“城市绿色空间”“城市蓝色空间”“城市蓝绿空间”三者概念与内涵的基础上，利用CiteSpace可视化分析软件，对2000-2021年中英文文献的发文量与关键词共现进行了定量分析、定性归纳与比较。在这些研究中，城市绿色空间生态效益作为最早被关注的对象，相关研究较为丰富与全面，除风景园林学科外，气象学、地学、生态学等领域也对其展开了大量研究，极大程度上促进了对绿色空间生态效益的多方面认知。对于蓝色空间生态效益的研究最早集中于地理学、环境资源学等领域的大尺度研究，近年来也逐步转向城市内部的小尺度区域。目前对于城市蓝绿空间生态效益的研究较少，但是从发文量等情况来看，以中国学者为代表的研究者们对其的关注日益提高，且呈现出多学科交叉的研究趋势。

城市蓝绿空间在空间中彼此交织、伴生，在生态效益上互相影响、促进，城市绿

色空间与蓝色空间的协同能够更好发挥生态效益^[66]。因此，应从整体上审视城市蓝绿空间的作用，对于单一的绿色空间或蓝色空间的研究具有局限性，无法从系统的角度构建起蓝绿空间的关联，认知两者的协同作用机制。而作为蓝绿空间的组成部分，以往围绕城市绿色空间、蓝色空间中植物、土壤、水体等单一要素的研究同样适用于蓝绿空间，能够作为日后研究的基础。气候变化是全球面临的时代挑战，城市蓝绿空间在提升雨洪韧性、降低城市温度、缓解热岛效应以及协助城市应对未来气候变化方面起着重要的作用，由此以上三个方面在今后仍会是研究的重点。

综上所述，今后关于城市蓝绿空间的研究可围绕以下几点展开。

解析蓝绿空间协同机制，完善蓝绿空间规划方法。城市蓝绿空间作为功能相似且相互影响的城市生态本底，两者协同发展能大幅提高雨洪管理、降温效应、碳汇效益等生态服务效能，有助于建设高质量人居环境。为了城市蓝绿空间的生态服务效益最大化，未来的研究应首先深入剖析蓝绿空间协同机制、厘清影响两者协同的关键因素；其次，在城市规划设计实践中，以蓝绿协同发展为导向，重视城市蓝绿空间的耦合，尊重城市蓝绿空间物质交换、能量流动、相互作用的自然过程，以蓝绿空间的自然协同实现城市韧性提升。

构建蓝绿空间耦合评价体系，研发定量分析评价技术。在公园城市的建设中蓝绿空间耦合评价已有初步实践^[67]，但完整、系统的城市蓝绿空间耦合评价体系尚未确立。现有的研究多是基于单一目标的耦合体系构建，相关指标及其内涵也有待形成共识。然而城市蓝绿空间中的植被、土壤、水体等要

素以及空间格局的改变往往同时作用于多种生态效益，对蓝绿空间的耦合评价体系也应涵盖多种生态效益的提升与量化评价。如何评判城市蓝绿空间的耦合特征？哪些指标可以表征蓝绿的耦合程度？什么是城市不同功能区蓝绿空间的最优布局？对于不同形态特征的城市蓝绿空间是否需要构建针对性的评价体系？在日后，以上问题可以结合数字孪生建模、参数分析、仿真模拟、实测校验等技术手段展开具体研究，为城市空间规划、管理决策提供理论支撑和定量支持。

探索蓝绿空间融合模式，建立功能绩效评估体系。近年来中国城市逐步进入存量发展时代，在有限的城市空间中最大限度发挥蓝绿空间生态效益、复合化蓝绿空间功能是当前亟待探讨的问题。以往的研究针对城市蓝绿空间融合已有了部分探讨与实践^[68]，在未来应从多尺度、多视角出发，探索更多城市蓝绿空间融合模式。宏观上，要针对不同城市区位，结合城市形态特征制定蓝绿空间优化模式；在中小尺度上，应尊重城市蓝绿空间内部要素的自然共生关系，构建“绿中有蓝，蓝中有绿”的人居环境。同时，需要建立全方面、多层次的城市蓝绿空间功能绩效评估体系，构建分情况、分层级的反馈机制，保障城市蓝绿空间生态效益与发展需求相适配。

注：文中图表均由作者自绘。

参考文献

[1] FAN H, YU Z, YANG G, et al. How to Cool Hot-humid (Asian) Cities with Urban Trees? An Optimal Landscape Size Perspective [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 265: 338-348.
[2] 崔洁, 许浩, 刘伟. 近20年徐州都市圈蓝绿空间景观格局演变分析[J]. 园林, 2022, 39(07): 75-81.

[3] 陈子逸. 武汉市都市发展区蓝绿空间演变趋势及优化策略研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2019.
[4] 国务院关于河北雄安新区总体规划(2018-2035年)的批复[N]. 中华人民共和国国务院公报, 2019, (02): 26-29.
[5] 成实, 成玉宁. 从园林城市到公园城市设计——城市生态与形态辨证[J]. 中国园林, 2018, 34(12): 41-45.
[6] 自然资源部. 自然资源部关于全面开展国土空间规划工作的通知[Z/OL]. (2019-06-02). http://www.gov.cn/xinwen/2019-06/02/content_5396857.htm
[7] 吴岩, 贺旭生, 杨玲. 国土空间规划体系背景下市县蓝绿空间系统专项规划的编制构想[J]. 风景园林, 2020, 27(01): 30-34.
[8] TURNER T. Open Space Planning in London: From Standards per 1000 to Green Strategy [J]. Town Planning Review, 1992, 63: 365.
[9] 孙培博, 刘宁京. 国外不同尺度开放空间规划研究与借鉴[J]. 中国园林, 2021, 37(S1): 18-23.
[10] MATTHEWS M J, O' CONNOR S, COLE R S. Database for the New York State Urban Wildlife Habitat Inventory[J]. Landscape and Urban Planning, 1988, 15(1): 23-37.
[11] PAUL M J, MEYER J L. Streams in the Urban Landscape[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 2001, 32(1): 333-365.
[12] 王世福, 刘联璧. 从廊道到全域——绿色城市设计引领下的城乡蓝绿空间网络构建[J]. 风景园林, 2021, 28(08): 45-50.
[13] 黄铎, 易芙蓉, 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(01): 18-31.
[14] 黄娜, 石铁矛, 石羽, 等. 绿色基础设施的生态及社会功能研究进展[J]. 生态学报, 2021, 41(20): 7946-7954.
[15] YAZDANFAR Z, SHARMA A. Urban Drainage System Planning and Design - Challenges with Climate Change and Urbanization: A Review[J]. Water Sci Technol, 2015, 72(2): 165-179.
[16] 成玉宁, 袁畅洋. 让自然做功 事半功倍——正确理解“自然积存、自然渗透、自然净化”[J]. 生态学报, 2016, 36(16): 4943-4945.
[17] KIRNBAUER M C, BAETZ B W, KENNEY W A. Estimating the Stormwater Attenuation Benefits Derived from Planting Four Monoculture Species of Deciduous Trees on Vacant and Underutilized Urban Land Parcels[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2013, 12(3): 401-407.
[18] INKILÄINEN E N M, MCHALE M R, BLANK G B, et al. The Role of the Residential Urban Forest in Regulating Throughfall: A Case Study in Raleigh, North Carolina, USA[J]. Landscape and Urban Planning, 2013, 119: 91-103.

- [19] OW L F, CHAN E. Deferring Waterlogging Through Stormwater Control and Channelling of Runoff[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2021, 65: 127351.
- [20] 张月, 张飞, 王娟, 等. 近40年艾比湖湿地自然保护区生态干扰时空动态及景观格局变化[J]. 生态学报, 2017, 37(21): 7082-7097.
- [21] 吴健生, 张朴华. 城市景观格局对城市内涝的影响研究——以深圳市为例[J]. 地理学报, 2017, 72(03): 444-456.
- [22] BAKER A, BRENNEMAN E, CHANG H, et al. Spatial Analysis of Landscape and Sociodemographic Factors Associated with Green Stormwater Infrastructure Distribution in Baltimore, Maryland and Portland, Oregon[J]. Science of The Total Environment, 2019, 664: 461-473.
- [23] 禹佳宁, 周燕, 王雪原, 等. 城市蓝绿景观格局对雨洪调蓄功能的影响[J]. 风景园林, 2021, 28(09): 63-67.
- [24] 金云峰, 周艳, 沈洁. 蓝绿生态网络系统修复的LID雨景单元设计方法研究——基于山地水文特征分析[J]. 中国园林, 2018, 34(10): 83-87.
- [25] 李诗雨, 柏云声, 龚静仪, 等. 海绵小区蓝绿基础设施的生态效益综合评估与应用潜力分析[J]. 自然资源情报, 2022, (01): 63-70.
- [26] 左翔, 许博文, 刘晖. 基于蓝绿协同度评价的绿地格局优化研究[J]. 园林, 2022, 39(05): 30-36.
- [27] 冷红, 陈天, 翟国方, 等. 极端气候背景下的思考: 城乡建设与治水[J]. 南方建筑, 2021, (06): 1-9.
- [28] 成玉宁, 侯庆贺, 谢明坤. 低影响开发下的城市绿地规划方法——基于数字景观技术的规划机制研究[J]. 中国园林, 2019, 35(10): 5-12.
- [29] 徐洪, 杨世莉. 城市热岛效应与生态系统的关系及减缓措施[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2018, 54(06): 790-798.
- [30] AKBARI H, KOLOKOTSA D. Three Decades of Urban Heat Islands and Mitigation Technologies Research[J]. Energy and Buildings, 2016, 133: 834-842.
- [31] CHUN B, GULDMANN J M. Spatial Statistical Analysis and Simulation of the Urban Heat Island in High-density Central Cities[J]. Landscape and Urban Planning, 2014, 125: 76-88.
- [32] 张棋斐, 文雅, 吴志峰, 等. 高密度建成区湖泊水体的热缓释效应及其季相差异——以广州市中心城区为例[J]. 生态环境学报, 2018, 27(07): 1323-1334.
- [33] 戴茜, 陈存友, 胡希军, 等. 建筑因子对城市湖泊温度效应的模拟研究——以湖南烈士公园湖泊为例[J]. 生态环境学报, 2019, 28(01): 106-116.
- [34] 武小钢, 蔺银鼎, 闫海冰, 等. 城市绿地降温增湿效应与其结构特征相关性研究[J]. 中国生态农业学报, 2008(06): 1469-1473.
- [35] 王琳, 祝亚鹏, 卫宝立, 等. 快速发展的中小城市地表热环境及水体温度调控作用研究——以山东省滨州市为例[J]. 水土保持通报, 2018, 38(02): 102-109.
- [36] 王娟, 蔺银鼎, 刘清丽. 城市绿地在减弱热岛效应中的作用[J]. 草原与草坪, 2006(06): 56-59.
- [37] PARK J, KIM J-H, LEE D K, et al. The Influence of Small Green Space Type and Structure at the Street Level on Urban Heat Island Mitigation[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2017, 21: 203-212.
- [38] 纪鹏, 朱春阳, 王洪义, 等. 城市中不同宽度河流对滨河绿地四季温湿度的影响[J]. 湿地科学, 2013, 11(02): 240-5.
- [39] 纪鹏, 朱春阳, 高玉福, 等. 河流廊道绿带宽度对温湿效益的影响[J]. 中国园林, 2012, 28(05): 109-112.
- [40] 秦仲, 巴成宝, 李湛东. 北京市不同植物群落的降温增湿效应研究[J]. 生态科学, 2012, 31(05): 567-571.
- [41] 李廷明, 张济和, 古润泽. 北京城市绿化与热岛效应的关系研究[J]. 中国园林, 2004(01): 77-80.
- [42] DU S, XIONG Z, WANG Y-C, et al. Quantifying the Multilevel Effects of Landscape Composition and Configuration on Land Surface Temperature[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 178: 84-92.
- [43] 王勇, 李发斌, 李何超, 等. RS与GIS支持下城市热岛效应与绿地空间相关性研究[J]. 环境科学研究, 2008(04): 81-87.
- [44] MOTAZEDIAN A, COUTTS A M, TAPPER N J. The Microclimatic Interaction of a Small Urban Park in Central Melbourne with Its Surrounding Urban Environment During Heat Events[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2020, 52: 126688.
- [45] 苏王新, 张刘宽, 常青. 基于MSPA的街区蓝绿基础设施格局及其热缓解特征[J]. 生态学杂志, 2022, 41(06): 1173-1181.
- [46] STOCKER T F, QIN D, PLATTNER G-K, et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. IPCC, Cambridge University Press, 2013.
- [47] 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.
- [48] 段巍岩, 黄昌. 河流湖泊碳循环研究进展[J]. 中国环境科学, 2021, 41(08): 3792-3807.
- [49] 田晶晶, 解旭东. 碳中和、碳达峰导向下的碳汇价值评估——以天津市蓝绿基础设施为例[J]. 城市建设, 2022, 19(04): 6-9.
- [50] 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(04): 1-5.
- [51] 赵艳玲, 阚丽艳, 车生泉. 上海社区常见园林植物固碳释氧效应及优化配置对策[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2014, 32(04): 45-53.
- [52] 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(05): 31-37.
- [53] 原一荃, 薛力铭, 李秀珍. 基于CASA模型的长江口崇明东滩湿地植被净初级生产力与固碳潜力[J]. 生态学杂志, 2022, 41(02): 334-342.
- [54] 石铁矛, 李沛颖, 汤煜. 碳中和背景下城市碳汇功能及提升策略——以沈阳核心区为例[J]. 中国园林, 2022, 38(03): 78-83.
- [55] 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(05): 24-30.
- [56] XIA C, LI Y, XU T, et al. Quantifying the Spatial Patterns of Urban Carbon Metabolism: A Case Study of Hangzhou, China[J]. Ecological Indicators, 2018, 95(01): 474-484.
- [57] 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(04): 1387-1398.
- [58] UPADHYAY S, SINGH R, VERMA P, et al. Spatio-temporal Variability in Soil CO₂ Efflux and Regulatory Physicochemical Parameters from the Tropical Urban Natural and Anthropogenic Land Use Classes[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 295: 113141..
- [59] RACITI S M, GROFFMAN P M, JENKINS J C, et al. Accumulation of Carbon and Nitrogen in Residential Soils with Different Land-Use Histories[J]. Ecosystems, 2011, 14(2): 287-297.
- [60] 王法明, 唐剑武, 叶思源, 等. 中国滨海湿地的蓝色碳汇功能及碳中和对策[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(03): 241-251.
- [61] 安吉, 李婷, 傅翔, 等. 城市化梯度带绿地土壤碳氮的空间分布特征[J]. 生态学杂志, 2019, 38(09): 2780-2787.
- [62] 汤煜, 石铁矛, 卜英杰, 等. 城市化进程中沈阳城市绿地土壤有机碳储量空间分布研究[J]. 中国园林, 2019, 35(12): 68-73.
- [63] 刘为华. 上海城市绿地土壤碳储量格局与理化性质研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2009.
- [64] 张桂莲, 仲启斌, 张浪. 面向碳中和的城市园林绿化碳汇能力建设研究[J]. 风景园林, 2022, 29(05): 12-16.
- [65] 周晨昊, 毛覃愉, 徐晓, 等. 中国海岸带蓝碳生态系统碳汇潜力的初步分析[J]. 中国科学: 生命科学, 2016, 46(04): 475-486.
- [66] 杨柳琪, 周燕, 罗佳梦, 等. 基于时空演变分析的武汉市城市蓝绿系统空间格局及其与城市发展的协同关系研究[J]. 园林, 2022, 39(07): 66-74.
- [67] YU Q, DU M J, LI H C, et al. Research on the Integrated Planning of Blue-Green Space towards Urban-Rural Resilience: Conceptual Framework and Practicable Approach[J]. Journal of Resources and Ecology, 2022, 13(03): 347-359.
- [68] 王冬冬, 陈亚斌. 公园城市理念下的城绿空间融合模式研究——基于天府新区公园城市规划实践[J]. 浙江园林, 2019(04): 8-13.