

城市绿色空间格局时空演变及其生态系统服务评价的研究进展与展望

成超男¹, 胡 杨², 赵 鸣^{1*}

(1. 北京林业大学园林学院, 北京 100083; 2. 同济大学建筑与城市规划学院, 上海 200092)

摘 要:科学合理的城市绿色空间格局是城市可持续发展的物质空间保障, 对其时空演变和影响因素进行研究, 可揭示城市绿色空间在城镇化进程中各要素与演变过程的复杂关系, 以确保城市生态系统服务功能的正常发挥。在生态文明建设背景下, 城市绿色空间将在多尺度国土空间规划中发挥积极作用, 然而城市绿色空间规划与国土空间规划如何衔接却有待商榷。因此, 论文在梳理城市绿色空间概念界定和发展历程的基础上, 一方面讨论城市绿色空间格局的时空评价、驱动因子、情景模拟及优化策略的研究进展; 另一方面总结生态系统服务在城市绿色空间格局评价中的应用进展。通过归纳以上研究内容, 提出国土空间规划体系中有关城市绿色空间格局的评价及优化框架, 以期为新时期背景下的城市绿色空间规划提供参考。

关 键 词:城市绿色空间格局; 时空演变; 生态系统服务; 国土空间规划

近 40 a 的快速城镇化, 使中国城市的生态系统及资源环境问题不断加剧, 城市人口迅速增长导致城市空间的分配更加倾向于生产建设, 造成城市用地无序扩张、结构混乱、大量生态用地消失、土地和能源低效利用、城市绿色空间格局破碎、生态系统破坏、生物多样性丧失以及生态系统服务受损等相关生态环境问题的产生^[1], 进而使得社会公平问题日益凸显^[2], 限制了城市的可持续发展。因此, 更多中国学者开始认识到城市绿色空间对提升城市品质和遏制城市无序扩张的重要性。

城市绿色空间是城市生态系统的重要组成部分, 与人类生产生活空间密切相关, 其整体性、多样性及系统性很大程度上受到人类活动的干扰, 其格局呈现时空动态变化的特征。对城市绿色空间格局时空变化及影响因子的研究, 可揭示城市发展过程中各要素间的复杂关系, 亦可促进城市生态保护与经

济发展之间的协同与权衡, 以保障城市绿色空间格局的生态系统服务供给。伴随中国城市职能由生产向服务转变, 基于生态系统服务对城市绿色空间格局开展量性与质性相结合、多学科综合的研究已是国内外学者的共识, 亦成为生态学^[3]、地理学^[4]、景观生态学^[5]、环境科学^[6]、林学^[7]及风景园林学^[8]等领域的热点。然而, 目前有关中国城市绿色空间规划的研究, 仍滞后于城市发展阶段与当前国土空间规划的需求。此外, 目前有关城市绿色空间格局时空评价与其生态系统服务响应相结合的研究较少, 且缺乏科学系统的分析方法与研究框架。因此, 本文梳理城市绿色空间及其格局的定义与内涵、发展历程, 归纳并论述其时空评价及生态系统服务在城市绿色空间格局中的应用进展, 探讨城市绿色空间规划与国土空间规划的对接方式, 以期拓展中国城市绿色空间规划与建设的思路。

收稿日期: 2019-11-05; 修订日期: 2020-02-21。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0506903)。[Foundation: National Key Research and Development Program of China, No. 2018YFC0506903.]

第一作者简介: 成超男(1992—), 女, 内蒙古呼和浩特人, 博士生, 主要从事风景园林规划设计与理论研究。

E-mail: chengzi0403@126.com

*通信作者简介: 赵鸣(1964—), 男, 安徽阜阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事风景园林规划设计与理论及园林建筑研究。

E-mail: zm0940@126.com

引用格式: 成超男, 胡杨, 赵鸣. 城市绿色空间格局时空演变及其生态系统服务评价的研究进展与展望 [J]. 地理科学进展, 2020, 39(10): 1770-1782. [Cheng Chaonan, Hu Yang, Zhao Ming. Progress and prospect of the spatiotemporal change and ecosystem services evaluation of urban green space pattern. Progress in Geography, 2020, 39(10): 1770-1782.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.10.015

1 城市绿色空间的概念界定与发展历程

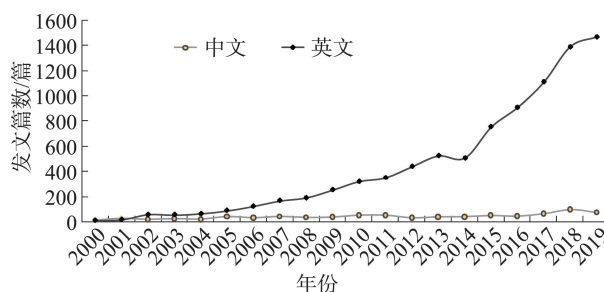
1.1 城市绿色空间及格局的定义与内涵

目前,学界对城市绿色空间并未给予明确定义,国外学者认为城市空间由绿色空间和灰色空间组成,其中绿色空间是维护城市“新陈代谢”与可持续发展的重要绿色基础设施^[9];而灰色空间是支持城市建设的功能性设施,如建筑、道路及桥梁等。国外研究模糊了城市绿色空间、城镇绿色空间以及城乡绿色空间的概念,认为城市绿色空间是被植被覆盖的全部城市用地^[10]。本文在梳理国内学者^[11]、西方国家学者^[12]、正经历快速城市化过程的发展中国家学者^[13]对城市绿色空间概念界定的研究,认为“城市绿色空间”的广义概念,更符合当代中国国土空间规划与城乡协同发展的需求,即由自然环境主导,以生态系统和景观价值为特征的空间,具有生态、游憩、文化、历史、景观等多种生态系统服务功能 and 价值。

城市绿色空间的形态和类型在城市空间内的组合与排布,构成了城市绿色空间格局^[14]。城市绿色空间格局包括城市绿地、农业用地以及水域等非城市建设空间,既包含城市建设用地内的绿色空间,也包括城市建设用地之外对城市生态环境质量、城市景观品质、居民宜居生活和生物多样性保护等有直接或间接影响的用地;不包括对生态系统和景观过程具有高程度干预的建筑环境。其定义涵盖城市绿色空间、城镇绿色空间以及城乡绿色空间3个层次,具有与城市建成区相互融合、相互渗透,且能够表达城市人工建设空间与自然空间相互作用的结构关系,符合国土空间规划在区域统筹发展方面的理念。此外,城市绿色空间格局的时空变化是影响城市景观结构和生态服务功能演变的主要因素,也深刻影响着城市的社会与经济发展。

1.2 城市绿色空间的发展历程

当代意义的城市绿色空间(urban green space, UGS)源自西方开放空间(open space)的概念。19世纪初在国外文献著作中首次出现绿色空间(green space)一词,直到21世纪初期,有关绿色空间的文献著作大量涌现(图1)。这与西方国家的城市发展建设密切相关,工业革命对城市居住环境的忽视,使得公众逐渐意识到城市中绿色空间的重要性。1851年第一部将城市公共空间领域转为城市公园



注:中文论文来源于知网;英文论文来源于“Web of Science”核心合集。

图1 城市绿色空间中/英文论文发表篇数(2000—2019年)

Fig.1 The number of Chinese/English articles on urban green space from 2000 to 2019

的法案在纽约通过,并于1858年建立纽约中央公园,该公园是第一个城市公园,也是城市绿色空间发展的里程碑;1877年,英国国家健康协会鼓励学校建立操场,以满足学生放学或周末户外活动的需要,并初次提出“城市开放空间”的概念。20世纪初,美国在“城市美化运动”中提出:为有益于居民的健康生活,城市需提供一些空间让居民进入和活动^[15],表明对城市绿色空间的研究开始从单个公园转向城市整体。

二战后城市的重建与扩张引发了对城市周边环境关注,1898年Ebenezer Howard提出“田园城市”^[16],强调城市建设应采用低密度组团的形式,即利用大面积绿色空间降低城市密度,以创造优美宜居的生活环境,其概念阐述了城市建设应与绿色空间协调发展的理念,使得绿色空间被视为控制城市规模增长的重要手段。在20世纪90年代,美国、巴西和新西兰等国家,逐渐将城市绿色空间规划作为城市发展的有机组成,纳入规划体系中,并颁布相应的规划政策^[17]。到21世纪,城市化和土地覆盖变化是全球变暖和气候变化研究中的重要议题^[18]。城市化进程导致了环境恶化和全球生物多样性的丧失,而研究表明城市中的绿色空间从各方面提高了城市生活的品质,如提供生态系统服务、保护生物多样性、促进公共卫生、鼓励社会互动、影响房地产价格、减轻城市热岛效应、改善城市公平正义以及提高城市居民的健康和福祉等^[19]。因此,城市绿色空间的时空演变及其格局的生态系统服务响应已经成为城市可持续发展的一个重要课题^[20]。

中国对绿色空间的研究起始于20世纪80年代,孙筱祥先生^[21]于1980年在《园艺学报》探讨了绿

色空间系统研究;1981年,张万佛^[22]阐述了中国较早的城市绿色空间研究成果。此后,中国有关城市绿色空间的研究不断涌现(图1),如李锋等^[23]对城市绿色空间和生态服务功能进行阐述,并综述了国内外城市绿色空间生态服务功能的研究进展;常青等^[24]从城乡边缘区规划保育、绿色廊道恢复规划、生物多样性保护等6个方面总结了城市绿色空间的研究进展;陶宇等^[25]总结了城市绿色空间定量研究方法;杨振山等^[26]从城市可持续发展、城市规划建设、研究方法创新等方面探讨了城市绿色空间的研究进展。随着国外先进理念和方法的引入,中国城市绿色空间的概念也不断得到拓展,相关研究主要涉及城市绿色空间格局的时空演变及其生态系统服务功能等方面。

2 城市绿色空间格局时空演变及其相关领域的研究进展

2.1 研究城市绿色空间格局时空演变的技术方法

自20世纪80年代以来,地理信息系统(Geographic Information System, GIS)和遥感(Remote Sensing, RS)技术迅速发展,学者们从多时相历史遥感影像中获得长期动态数据和研究细节,遥感技术被广泛应用于监测不同尺度景观格局变化及植被动态等相关研究。城市绿色空间类型提取及其格局演变特点的研究,可基于地理信息系统与遥感影像,结合信息熵、扩展速度或扩展系数等指标计算。以上技术被城市化水平较高地区的城市绿色空间格局时空评价的相关研究广泛使用,研究揭示了城市绿色空间转变为城市用地的过程,尤其是城郊绿色空间面积的急剧下降^[27]。此外,采用遥感数据的线性光谱分离法反演得到城市植被覆盖度,经图像差分处理,能较为精确地揭示植被分布的时空变化。类似研究包括根据植被覆盖的归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)图层间的差异,得到城市绿色空间格局的时空分布变化,展现出城市发展过程中城市绿色空间直接转变为城市用地以及城市绿色空间先转变为裸地再间接转变为城市用地的2个过程^[28]。

2.2 城市绿色空间格局时空演变的驱动因子

推动城市绿色空间格局分布和结构不断变化的因素,主要分为自然因子、社会经济因子及政策因子3类。探索城市绿色空间格局时空观演变与驱

动因子或其与生态过程之间关系的研究,通常采用多元回归、最小二乘法(Ordinary Least Squares, OLS)及地理加权回归(Geographically Weighted Regression, GWR)等方法。最小二乘法是一种全局参数估计技术^[29],仅反映全球信息,缺乏解释局部关系的能力。因此,在探索城市绿色空间格局演变与驱动因子关系时,最小二乘法的性能和解释能力受到限制。而地理加权回归通过在研究区域的每个网格上,构建局部回归方程来反映关系的空间特征,从而避免了空间自相关、异质性和非平稳性等问题^[30],已被广泛用于空间相关性研究。目前,分析城市化,即社会经济因素对城市绿色空间格局时空演变影响的研究相对较多,但较少涉及城市绿色空间格局演变驱动因子的强度分析。

2.3 城市绿色空间格局时空评价的动态预测与情景模拟研究

模拟并预测城市绿色空间动态发展,可提高城市绿色空间应对未来空间类型变化带来的影响,有助于可持续发展战略的实施。进行城市动态模拟可更好地了解城市发展方向、洞悉城市绿色空间格局及生态系统服务的时空变化、预测区域或城市的规划活动,为城市绿色空间格局的优化策略提供一定依据^[31]。

2.3.1 城市绿色空间模拟与预测的研究方法

在过去30 a中,基于遥感影像和地理信息系统可视化城市空间动态的模拟技术蓬勃发展。基于情景建模(scenario-based modeling)可将城市动态模型与未来场景或替代方案相结合,在视觉输出技术的支持下,通过提供合理的解决方案,解释城市土地利用模式变化的不确定性,成为一个强有力的规划工具。这种方法的关键在于模拟情景有效地转换为建模语言,并有逻辑地展现出未来可能的不确定性。

现有研究通常将城市动态模拟实践的不同算法或技术纳入GIS平台,如激光探测与测量(light detection and ranging, LiDAR)^[32]、人工神经网络(artificial neural networks, ANN)^[33]、马尔可夫链模型(Markov chain models, MC)、土地变化模型(land change models, LCM)、回归模型^[34]、系统动力学(system dynamics, SD)^[35]、元胞自动机模型(cellular automata models, CA)^[36]、基于代理建模(agent-based modeling, ABM)^[37]、城市边界增长(urban growth boundary, UGB)^[38]、机器学习算法(machine learning

algorithms)^[39]和人工智能(artificial intelligence)^[40]等。其中,元胞自动机模型是空间栅格相互作用的动态模型之一,更适合于预测未来土地利用的变化,并在空间信息表达方面优于其他模型^[41]。而将基于代理建模同大数据相结合,可深化对地理系统动力机制的理解^[42]。

2.3.2 基于城市动态变化的城市绿色空间格局情景模拟

(1) 基于城市扩张的城市绿色空间格局情景模拟。城市绿色空间格局演变是城市其他空间类型相互作用的结果,更多受到城市扩张的影响。国内外学者对该领域的研究主要集中于:在城市扩张已造成环境问题的基础上,通过改变城市绿色空间分布结构的情景模拟,以寻求城市可持续发展的最适宜策略。相关研究包括城市绿色空间对雨洪的调控^[43]、对温室气体的改善^[44]、对热环境的缓解^[45]、对有害气体^[46]及污染土壤的净化^[47]等方面的模拟。中国处于快速城市化阶段,到2011年底,中国城市人口为6.7亿,城市化率为51.27%,这是城市人口第一次超过农村人口;2016年,中国城市化率达到57.35%,相当于世界平均水平;到2030年,中国城市化率预计将达到75%。因此,有关城市扩张与城市绿色空间格局演变的研究逐渐成为城市地理学、城市规划学、风景园林学和城市生态学等领域的热点。如 Song 等^[48]定量估算1992—2015年中国290个城市的城市绿色空间演变特点,认为城市扩张过程直接导致了新旧城区之间城市绿色空间的差异。此外,学者们先后对北京^[49]、天津^[35]、大连^[50]等城市及京津冀地区^[51]、珠江三角洲^[52]等地区,进行了基于城市扩张的城市绿色空间格局动态预测与情景模拟的研究。

(2) 基于紧凑型城市的城市绿色空间格局情景模拟。有关城市增长形式的争论,集中于“扩张”和“紧凑增长”之间的对比。紧凑增长或紧凑型城市,即高密度、功能复合的城市发展理念,被广泛认为是抵消城市扩张和土地过度使用所造成的负面影响的替代形式,也是一种城市可持续的形式,能遏制城市化对残余自然区域的影响。基于紧凑型城市的城市绿色空间格局情景模拟研究,如 Sun 等^[7]以厦门岛的新建城区为研究对象,研究发现随着厦门岛建设的紧凑化,相比于旧建成区,新建成区的绿色空间所占比例更大、类型更丰富;Xu 等^[53]以慕尼黑为例,权衡不同情景下城市绿色空间的人均绿色空间面积及可获得绿色空间的人口比例2个指

标,发现若缺失有效的城市绿色空间政策,城市扩张与紧凑型城市均导致城市绿色空间的严重流失。

(3) 基于收缩型城市的城市绿色空间格局情景模拟。收缩城市的概念源于德国早期的人口流失研究,之后隐喻因去工业化导致人口和经济衰退的城市^[54]。收缩城市是一条发展道路,在欧洲的老工业区(英格兰北部、苏格兰克莱德地区、洛林、莱茵鲁尔地区)、欧洲大部分后社会主义国家、美国的“Rust Belt”地区以及日本、韩国,这个过程已经开始,南非等发展中国家的城市近期也出现了收缩现象。中国正处于新型城市化的快速发展阶段,城市增长与空间扩张仍然是学界与政策界关注的重点,目前中国有关收缩城市中绿色空间发展的研究,主要局限于以对德英美等典型收缩城市的研究概述与经验总结^[55]。如吴康等^[56]通过对土地利用进行收缩模拟,表明绿色空间存储制度是促进收缩城市可持续发展的有力措施,据此展望中国收缩城市研究。

2.4 基于城市绿色空间格局时空评价与情景模拟的优化策略研究

在城市绿色空间格局时空评价及情景模拟的基础上,结合生态安全格局对城市绿色空间格局提出优化策略,可在确保城市绿色空间格局生态安全与合理划分的基础上,丰富城市绿色廊道功能、提升城市绿色空间的景观多样性、娱乐性及可用性,以满足人民对户外活动空间的需求;亦可促进对生态空间、生活空间、生产空间以及生态红线、城镇开发边界和基本农田科学划定方法的深入探讨。相关研究如 Peng 等^[57]构建生态要素、生态重要性和生态恢复力指标体系,评价云南西部中央部分大理州的生态抗性,从最高生态适宜性到最低生态适应,将研究区划分为先行开发区、中等开发区、潜在开发区、限制开发区和禁止开发区;常青等^[58]基于GIS技术,综合运用生态适宜性、敏感性和连通度评价等景观生态学理论与方法,以山东省即墨市为例,探索了中小城镇绿色空间评价与格局优化方法,得出城镇发展的生态管制刚性区和引导发展弹性区。

3 生态系统服务在城市绿色空间格局评价中的应用进展

3.1 城市绿色空间格局生态系统服务的定量评价

生态系统服务(ecosystem services, ES)是自然生态系统及其物种为保障人类生活而提供的一系

列过程和条件,是人类直接或间接从自然中获得的益处^[59]。近年来,由于城市生态环境问题日益显著,基于生态系统服务的定量评价研究受到重视,这为生态环境的可持续发展提供更精准的决策支持,学者们制定了一些定量评价框架,并促进了该领域在理论与实践方面的发展。相关评价框架除千年发展目标(Millennium Development Goals, MDG)外,还有一些更新框架,如政府间生物多样性和生态系统服务科学政策平台(Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, IPBES)、欧洲环境局(European Environment Agency, EEA)、生态系统服务国际通用分类(Common International Classification of Ecosystem Services, CICES)以及生态系统服务和权衡工具的综合评估(Integrate Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs Tool, InVEST)。其中,使用最广泛的评价框架之一是1999年Smeets等^[60]在EEA报告中,首次介绍了驱动力、压力、状态、影响和响应模型(Driving Forces, Pressures, State Impacts and Responses, DPSIR),该模型是研究社会经济活动与生态环境之间因果关系的框架,其所有环境因果关系链均由环境指标构成,以满足决策者的信息需求。国内傅伯杰等^[61]基于CICES分类体系,采用专家咨询和频度分析法,构建了中国生物多样性与生态系统服务的评估指标体系,但未强调城市尺度生态系统服务的需求;谢高地等^[62]基于Costanza等^[59]的17分类法,结合专家访谈得出的适合中国国情的分类法应用更为广泛。以上基于生态系统服务所构建的定量评价框架,促进了生态系统服务的定量评估、政策应用、重点示范和国际合作能力。

城市绿色空间格局与生态系统服务有着密不可分的关系,前者既是后者发挥作用的物质载体,又影响后者功能的提供^[63]。基于生态系统服务的城市绿色空间格局定量评价,侧重于评估生态系统提供的人类福祉,不同尺度的城市绿色空间提供的生态系统服务功能不尽相同,体现出生态系统服务对空间格局的尺度依赖性^[64]。城市绿色空间的生态系统服务定量评价,不仅受到景观生态学斑块、地方和区域尺度的影响,而且受限于场地级、街区级、邻里级、中心区以及边缘区等城市行政区划,且研究范围越聚焦,所需数据精度越高^[65]。

城市绿色空间的尺度与类型具有多样性、城市绿色空间格局及生态系统服务之间的生态价值关

系难以评估以及缺乏统一的评价指标及技术路线等因素,致使相关研究进展缓慢。目前,基于生态系统服务的城市绿色空间格局定量评价主要涉及2个方面:一方面计算城市绿色空间格局产生的生态系统服务价值量;另一方面根据生态系统服务功能指标,评估城市绿色空间格局的生态系统服务功能。此外,针对于生态系统服务评估以及定量绘图的研究,有助于支持决策、促进景观规划和城市绿色空间规划的发展。如Martínez-Harms等^[66]总结了生态系统服务图示化方法(mapping approach),并强调了城市生态系统服务多尺度评估的重要性。

3.1.1 城市绿色空间格局的生态系统服务价值量计算

由于不存在绿色空间市场,城市绿色空间格局的生态系统服务价值量计算需要非市场评估方法来估算绿色空间所产生的生态系统服务价值量的货币价值。Costanza等^[59]提出支付意愿的方法(willingness-to-pay method)评估世界生态系统的服务价值。该研究建立了一个“单位价值”的模式,评估生态系统服务的货币价值,虽然这种研究方法存在一些固有缺陷^[67],但已经被广泛应用于各种类型和尺度的生态系统中,特别是运用于地理覆盖范围相当大的绿色空间的研究。通常人们对城市绿色空间格局的支付意愿,采用间接的方法来衡量,其中HPM(Hedonic Price Model)是将绿色空间价值与房地产价格分开的典型方法。如Xu等^[68]基于HPM模型,分析城市绿色空间格局的丰富性、可达性、分布及形态配置与生态系统服务价值量之间的关系,发现城市绿色空间格局对实现其生态系统服务价值具有重要影响。然而,以上基于“单位价值”的方法,是建立于生态系统服务价值与空间维度无关的假设之上的,这种方法可能仅适用于较大的范围。

3.1.2 城市绿色空间格局的生态系统服务功能评估

通常利用生态系统服务功能指标体系、空间模型或景观指数评价城市绿色空间格局的生态系统服务功能。适宜的功能指标是定量评价城市绿色空间格局生态系统服务的基础,由千年生态系统评估(Millennium Ecosystem Assessment, MA)提出的生态系统服务功能指标包括供给服务、支持服务、调节服务及文化服务。尽管该分类系统存在质疑,但该评估体系融合人类福祉,较好地表达了城市绿色空间的社会属性,是生态系统服务评价的重要参照,已被海内外众多研究者广泛支持和应用。如

Abram等^[69]通过对185个村庄的1837人进行有关婆罗洲森林的供给服务、文化/精神服务、调节服务和支持服务以及村民对该森林看法转变等问题的调查与访谈,将当地人对婆罗洲森林生态系统服务益处和使用看法空间化,并建议将研究成果纳入到土地利用规划、城市发展规划以及未来的战略实施中。此外,有关城市绿色空间格局的调节服务、支持服务及文化服务中某一特定生态系统服务供应能力的定量评价研究相对广泛(表1)。城市绿色空间格局的调节服务涉及气候调节、空气净化、碳储存、水资源调节、水土保持、水源涵养、防灾避险等;支持服务如生物多样性保护;文化服务包括教育、文化、健康和娱乐等。较多研究涉及城市绿色空间格局调节服务及支持服务,而有关城市绿色空间格局的文化价值如位置感、美学、精神信仰以及幸福感等方面的研究较为不足。

3.2 城市绿色空间格局时空演变与其生态系统服务响应

景观格局指数能揭示城市绿色空间格局的时空变化特征^[86],而城市绿色空间格局的时空演变与城市发展及城市生态环境密切相关。采用景观格

局指数定量分析城市绿色空间格局演变的时空特征及其与生态系统服务间的关系,可为城市生态管理提供支持。区域尺度景观格局的变化直接影响生态系统服务的空间分布,而景观格局的变化则可能间接影响景观生态过程^[87]。中国学者曾先后对北京^[88]、西安^[89]、广州^[90]、南京^[91]和上海^[92]等城市的绿色空间格局和其生态系统服务响应进行研究,证实城市绿色空间格局的时空演变深刻影响城市的生态系统服务,相关研究对城市生态系统修复、城市规划和区域生态多样性策略制定等领域具有重要意义^[61]。

3.3 基于生态系统服务的城市绿色空间格局情景模拟

IPBES平台2016年出版的《生物多样性和生态系统服务模拟和预测方法评估报告》将生态系统服务预测分为探索型情景(exploratory scenarios)、目标寻求型情景(target-seeking scenarios)和政策筛选型情景(policy-screening scenarios)3类^[93]。基于城市绿色空间格局情景模拟的生态系统服务评估研究,如Sun等^[84]采用CA-Logistic-Markov模型分析亚特兰大都市圈1985—2012年的景观格局变化,评估该地区生态系统服务的空间分布,并模拟2030年4种景

表1 评估城市绿色空间格局的生态系统服务功能
Tab.1 Evaluation of ecosystem services function of urban green space patterns

生态系统服务功能指标		研究目的	研究方法	研究内容/研究结果
一级类	二级类			
调节服务	改善气候	城市绿色空间格局与城市热岛、城市冷岛	遥感影像、景观格局指数评价	城市绿色空间格局的遮阳、蒸发和蒸腾过程,可有效缓解城市热岛现象 ^[70] ;城市绿色空间格局时空演变与城市热环境的关系 ^[71] ;采用14个景观指数,定量分析城市绿色空间格局与城市热岛之间的关系 ^[72] ;城市内不同形状的绿色空间、植物群落结构等对城市冷岛的形成有着不同影响 ^[73]
	空气调节	城市绿色空间格局与PM _{2.5} 、碳储存	形态空间模式分析方法、景观格局指数评价	从空间视角出发,采用形态空间模式分析方法将城市绿色空间分为7类,通过景观格局的演变分析城市绿色空间格局与PM _{2.5} 之间的关系 ^[74] ;分析长春市城市森林格局的时空演变,研究城市绿色空间对城市CO ₂ 的吸收以及碳储存 ^[75]
	水资源调节	城市绿色空间格局与水资源调节	景观生态安全格局、生态红线	以北京雁栖湖流域为例,通过划定水生态空间红线,确保水体生态系统服务功能的持续发挥 ^[76]
	雨水调节	城市绿色空间格局与雨水调节	雨水径流的经验模型、景观格局指数评价	研究北京城市绿色空间的景观格局变化及其对雨水径流减少的影响 ^[77] ;研究城市绿色空间与蓝水消耗之间的平衡 ^[78] ;评估城市绿色空间的蓝色水足迹 ^[79]
支持服务	生物多样性保护	城市绿色空间格局与鸟类多样性保护及动物栖息地规划	SPOT-XS多光谱卫星图	以鸟类为例,认为分区制能够解决城市绿色空间中动植物栖息与游憩功能之间相矛盾的状况 ^[80] ;通过关键栖息地和乡土种的选择,结合空间规划,提出城市绿色空间的规划方法 ^[81]
文化服务	身心健康	城市绿色空间格局与健康	可达性分析、普通最小二乘回归模型	以英国布里斯托尔地区为例,分析城市绿色空间可达性与身体活动和超重人群的关系 ^[82] ;研究美国城市绿地空间格局的空间异质性与身体健康指数之间的关联 ^[83]
	娱乐功能	城市绿色空间的户外休闲服务评价	娱乐机会频谱模型(Recreational Opportunity Spectrum, ROS)、调查、空间数据分析、主成分分析	采用ROS模型评估了美国亚特兰大都市的户外休闲服务 ^[84] ;通过将基于多样性指数的多维生物物理测绘图与用户的重要性分数相结合,作为城市公园非货币估值的方法,对挪威奥斯陆城市绿色空间的娱乐服务功能进行评估和分类 ^[85]

观情景下的生态系统服务特征,以探索增强生态系统服务的最佳土地利用策略;Ramya等^[94]选取伊朗首都德黑兰的高密度住宅为研究对象,通过对不同情景下绿色空间的配置,寻求可以缓解热岛效应的最佳绿色空间方案。有关生态系统服务情景模拟的研究,目前集中于讨论土地利用信息与景观格局对生态系统服务的影响,分析城市绿色空间格局与生态系统服务之间关系的研究较为不足。

4 城市绿色空间格局评价及优化框架和国土空间规划的衔接

城市绿色空间格局是国土空间规划全域和全要素的重要组成,不仅在国土空间规划“双评价”中发挥积极作用,而且影响“三生空间”的划分和空间品质的提升。“双评价”是实现绿色发展的基础性和约束性评价,其中的资源环境承载力评价,本质为生态承载力评价(ecological carrying capacity, ECC),是国土空间内生态系统服务功能、自然资源和环境容量下人类活动的最大规模,是对自然资源和生态环境的综合评价。生态承载力评价方法以生态足迹计算最为广泛,为弥补生态足迹法的不足,学者们逐渐将生态系统服务、景观格局、绿色空间及植被变化情况引入其中。如刘世梁等^[95]综合碳储存、水土保持、水源涵养、生物多样性保护、防风固沙、休憩能力、最大斑块指数、景观形状指数、香农多样性指数、蔓延度指数以及净初级生产力变化率11个指标,评价了石家庄市绿色空间的资源环境承载力。而开发适宜性评价遵循土地适宜性思想,本质上以土地为实体,在空间功能分区理论概念及内涵的基础上,通过考察自然资源、生态环境、灾害风险、人文社会和经济等方面的相关要素,确定研究区域的城镇化和工业化的发展方向及适宜程度^[96]。随着土地适宜性思想的深入,许多学者从适宜性评价^[97]、潜力与弹性区^[98]、国土空间规划^[99]以及城市绿色空间格局优化^[100]等角度进行了大量的研究。

综上,城市绿色空间格局的相关理念和方法已逐步介入国土空间规划的底线管控之中。本文在梳理城市绿色空间的定义、发展历程、研究进展和方法的基础上,尝试构建城市绿色空间格局评价及优化框架(图2),该框架由城市绿色空间格局评价和城市绿色空间格局优化2部分组成,分别对接“双评

价”及“三线三区”划分。城市绿色空间格局评价包括定量评价、时空评价与情景模拟,其中定量评价是城市绿色空间生态系统服务的反馈;城市绿色空间格局演变深刻影响其生态系统服务的提供;情景模拟为时空评价及城市绿色空间格局优化提供依据,又可根据城市绿色空间格局的优化结果,分析城市绿色空间的生态系统服务供给情况及模拟情景的合理性,为政策制定提供参照。

5 总结与展望

本文梳理了国内外城市绿色空间及其格局的定义和发展历程,认为城市绿色空间的内涵涉及城市绿色空间、城镇绿色空间以及城乡绿色空间3个层次,研究范围也从城市绿色空间向区域绿色空间转变,符合区域统筹发展下的国土空间规划理念,是新时代背景下城市绿色空间与国土空间规划在不同尺度对接的基础。此外,文中阐述了当前城市绿色空间格局重点领域中的时空评价、驱动因子、情景模拟及优化策略的研究进展;并总结当前热点领域,即生态系统服务在城市绿色空间格局评价中的应用。将有关城市绿色空间格局已有方法、理论尝试与国土空间规划中的“双评价”及“三线三区”划分对接。对未来基于城市绿色空间格局时空演变及其生态系统服务评价的研究提出以下建议。

5.1 开展多尺度的城市绿色空间格局研究

20世纪后期,区域绿色空间逐渐受到国外学者的关注,而中国对城市绿色空间格局的研究限于城市建成区,忽视了城市建成区与周边地区空间模式的关系,缺乏区域层面的城市绿色空间格局的系统性研究。但随着中国城市化的快速发展和城乡关系的日益密切,区域生态系统功能和生态安全面临挑战,城市绿色空间的发展应统筹城市建成区的绿色空间、城镇绿色空间及城乡绿色空间等多层次的评价与优化研究,从而更好地解释多尺度下城市生态环境与土地开发的复杂关系,确保自然生态系统结构的稳定和功能的安全,进而合理分配生态空间、生产空间与生活空间,落实国土空间的合理划分及城市资源的科学调配,以实现城市可持续发展与绿色发展。

5.2 深化城市绿色空间格局的时空演变与情景模拟研究

基于城市绿色空间格局的时空动态演变与情

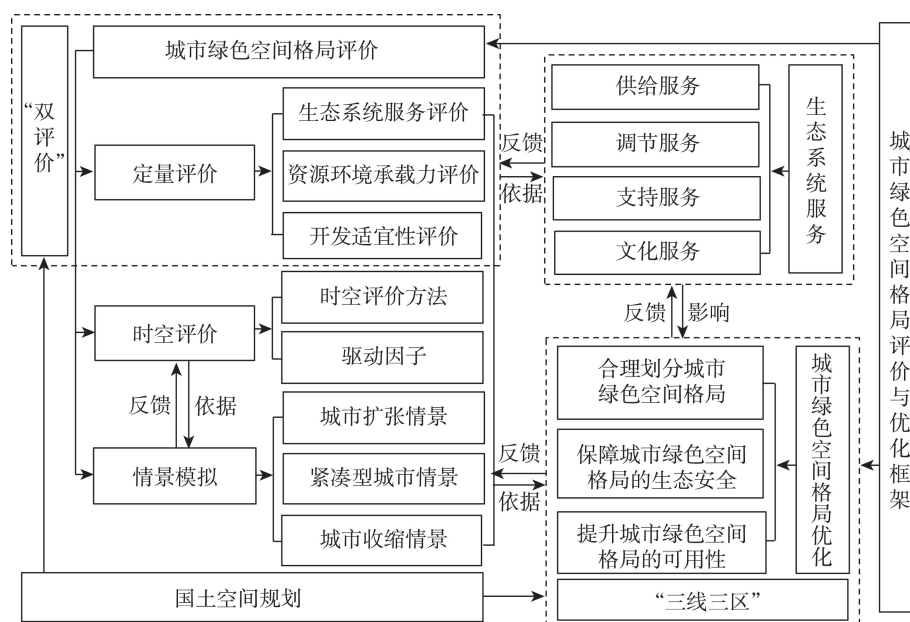


图2 城市绿色空间格局与国土空间规划的衔接

Fig.2 Connections between urban green space pattern and territorial spatial planning

景模拟,可为城市绿色空间格局保护与优化、生态系统服务功能的定量评价及制定城市未来不确定发展的多个应对方案等方面提供科学依据,亦可促进国土空间的弹性发展。但现有城市动态变化及情景模拟的研究,大多侧重于探索土地利用关系、景观格局变化、生态系统服务动态及其与自然和半自然景观中土地利用变化之间的关系;而有关评估城市生态系统中多个生态系统服务的时空动态或预测生态系统服务未来变化与城市绿色空间格局之间关系的研究相对较少。此外,有关城市绿色空间格局演变及驱动因子的研究多集中于表面认知和解析层面,需加强对城市绿色空间格局演变机制及内因方面的探索。随着城市人口增加和城市绿色空间的大量减少,城市绿色空间的稀缺性开始显现,有关城市绿色空间格局的研究也将逐渐成为经济学、社会学、地理学和医学等诸多领域的热点。

5.3 拓展城市绿色空间格局评价及优化的技术方法

在生态智慧城市建设背景下,当前城市绿色空间格局的评价与优化研究,多以遥感影像、GIS以及大数据为支撑,采用多源数据进行城市绿色空间的空间信息提取、动态监测、情景模拟、了解使用人群需求等综合方法,对城市绿色空间格局进行定量和定性分析。城市生态系统的复杂性决定了城市绿色空间评估内容的多样性,定量分析城市绿色空间的类型组成、数量特征和动态演变等结构特征,可

以帮助理解城市绿色空间的发展演变过程,为分析快速城市化及人类活动影响下的城市空间格局的优化调控策略提供至关重要的科学依据。此外,生态系统服务的分类系统、评价指标、景观指数、资源环境承载力评价与开发适宜性评价等定量评价为城市绿色空间格局提供了量化途径。

参考文献(References)

- [1] Haase D, Nussli H. Does urban sprawl drive changes in the water balance and policy? The case of Leipzig (Germany) 1870–2003 [J]. Landscape and Urban Planning, 2007, 80(1-2): 1-13.
- [2] Frenkel A, Israel E. Spatial inequality in the context of city-suburb cleavages-Enlarging the framework of well-being and social inequality [J]. Landscape and Urban Planning, 2017, 177: 328-339.
- [3] Hu T, Peng J, Liu Y X, et al. Evidence of green space sparing to ecosystem service improvement in urban regions: A case study of China's Ecological Red Line policy [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 251: 119678. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119678.
- [4] Lopes M N, Camanho A S. Public green space use and consequences on urban vitality: An assessment of European cities [J]. Social Indicators Research, 2012, 113(3): 751-767.
- [5] Photis Y N, Mougiakou E. Urban green space network evaluation and planning: Optimizing accessibility based

- on connectivity and raster GIS analysis [J]. *European Journal of Geography*, 2014, 5(4): 19-46.
- [6] Ren Z B, Zheng H F, He X Y, et al. Estimation of the relationship between urban vegetation configuration and land surface temperature with remote sensing [J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2015, 43(1): 89-100.
- [7] Sun C G, Lin T, Zhao Q J, et al. Spatial pattern of urban green spaces in a long-term compact urbanization process: A case study in China [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 96(Part 2): 111-119.
- [8] 苏雷, 李俊英, 樊梦雪. 基于遥感的城市绿色空间时空演变与生态效应研究综述 [J]. *云南地理环境研究*, 2018, 30(6): 1-9. [Su Lei, Li Junying, Fan Mengxue. Measurement and spatial-temporal differences of green development capability in Anhui Province. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2018, 30(6): 1-9.]
- [9] Lovell S T, Taylor J R. Supplying urban ecosystem services through multifunctional green infrastructure in the United States [J]. *Landscape Ecology*, 2013, 28(8): 1447-1463.
- [10] Niemelä J, Saarela S-R, Söderman T, et al. Using the ecosystem services approach for better planning and conservation of urban green spaces: A Finland case study [J]. *Biodiversity and Conservation*, 2010, 19(11): 3225-3243.
- [11] 孙海清, 许学工. 北京绿色空间格局演变研究 [J]. *地理科学进展*, 2007, 26(5): 48-56. [Sun Haiqing, Xu Xuegong. Study on green space pattern changes in Beijing. *Progress in Geography*, 2007, 26(5): 48-56.]
- [12] Feltynowski M, Kronenberg J, Bergier T, et al. Challenges of urban green space management in the face of using inadequate data [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 31: 56-66.
- [13] Girma Y, Terefe H, Pauleit S, et al. Urban green spaces supply in rapidly urbanizing countries: The case of Sebeta Town, Ethiopia [J]. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2019, 13: 138-149.
- [14] 金佳莉. 泛太平洋地区典型城市绿色空间格局的时空演变规律研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2018. [Jin Jiali. Research on spatio-temporal evolution of urban greenspace patterns in typical pan-pacific metropolises. Beijing, China: Chinese Academy of Forestry, 2018.]
- [15] Hickman C. 'To brighten the aspect of our streets and increase the health and enjoyment of our city': The national health society and urban green space in late nineteenth century London [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2013, 118: 112-119.
- [16] Howard E. To-morrow: A peaceful path to real reform [M]. London, UK: Swan Sonnenschein & Co., Ltd., 1898.
- [17] Sperandelli D I, Dupas F A, Pons A D. Dynamics of urban sprawl, vacant land, and green spaces on the metropolitan fringe of São Paulo, Brazil [J]. *Journal of Urban Planning and Development*, 2013, 139(4): 274-279.
- [18] UN-Habitat. Cities and climate change: Global report on human settlements 2011 [M]. London, UK and Washington D C, USA: Routledge, 2011.
- [19] Mehrotra S, Bardhan R, Ramamritham K. Outdoor thermal performance of heterogeneous urban environment: An indicator-based approach for climate-sensitive planning [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 669: 872-886.
- [20] Sathyakumar V, Ramsankaran R, Bardhan R. Geospatial approach for assessing spatiotemporal dynamics of urban green space distribution among neighbourhoods: A demonstration in Mumbai [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020, 48: 126585. doi: 10.1016/j.ufug.2020.126585.
- [21] 孙筱祥. 城市园林绿地系统布局与环境保护 [J]. *园艺学报*, 1980, 7(4): 49-54. [Sun Xiaoxiang. A study on park and green space system with special reference to urban environmental protection. *Acta Horticulturae Sinica*, 1980, 7(4): 49-54.]
- [22] 张万佛. 人与绿色空间 [J]. *环境保护*, 1981, 12(2): 24-26. [Zhang Wanfo. Human and green space. *Environmental Protection*, 1981, 12(2): 24-26.]
- [23] 李锋, 王如松. 城市绿地系统的生态服务功能评价、规划与预测研究: 以扬州市为例 [J]. *生态学报*, 2003, 23(9): 1929-1936. [Li Feng, Wang Rusong. Evaluation, planning and prediction of ecosystem services of urban green space: A case study of Yangzhou City. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(9): 1929-1936.]
- [24] 常青, 李双成, 李洪远, 等. 城市绿色空间研究进展与展望 [J]. *应用生态学报*, 2007, 18(7): 236-242. [Chang Qing, Li Shuangcheng, Li Hongyuan, et al. Research progress on urban green space. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(7): 236-242.]
- [25] 陶宇, 李锋, 王如松, 等. 城市绿色空间格局的量化方法研究进展 [J]. *生态学报*, 2013, 33(8): 2330-2342. [Tao Yu, Li Feng, Wang Rusong, et al. Research progress in the quantitative methods of urban green space patterns. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(8): 2330-2342.]
- [26] 杨振山, 张慧, 丁悦, 等. 城市绿色空间研究内容与展望 [J]. *地理科学进展*, 2015, 34(1): 18-29. [Yang Zhenshan, Zhang Hui, Ding Yue, et al. Progress and prospect on urban green space research. *Progress in Geography*, 2015, 34(1): 18-29.]
- [27] Byomkesh T, Nakagoshi N, Dewan A M. Urbanization

- and green space dynamics in Greater Dhaka, Bangladesh [J]. *Landscape and Ecological Engineering*, 2012, 8(1): 45-58.
- [28] Rafiee R, Mahiny A S, Khorasani N. Assessment of changes in urban green spaces of Mashad city using satellite data [J]. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation*, 2009, 11(6): 431-438.
- [29] Zhang L J, Ma Z H, Guo L. An Evaluation of spatial autocorrelation and heterogeneity in the residuals of six regression models [J]. *Forest Science*, 2009, 55(6): 533-548.
- [30] Tenerelli P, Demšar U, Luque S. Crowdsourcing indicators for cultural ecosystem services: A geographically weighted approach for mountain landscapes [J]. *Ecological Indicators: Integrating, Monitoring, Assessment And Management*, 2016, 64: 237-248.
- [31] Haase D, Haase A, Kabisch N, et al. Actors and factors in land-use simulation: The challenge of urban shrinkage [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 35: 92-103.
- [32] García-Ayllón S. Retro-diagnosis methodology for land consumption analysis towards sustainable future scenarios: Application to a mediterranean coastal area [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 195: 1408-1421.
- [33] Li X, Yeh A G.O. Calibration of cellular automata by using neural networks for the simulation of complex urban systems [J]. *Environment & Planning A*, 2001, 33(8): 1445-1462.
- [34] Arsanjani J J, Helbich M, Kainz W, et al. Integration of logistic regression, Markov chain and cellular automata models to simulate urban expansion [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 21: 265-275.
- [35] Liu H B, Liu Y F, Wang H N, et al. Research on the coordinated development of greenization and urbanization based on system dynamics and data envelopment analysis: A case study of Tianjin [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 214: 195-208.
- [36] Gong W F, Yuan L, Fan W Y, et al. Analysis and simulation of land use spatial pattern in Harbin prefecture based on trajectories and cellular automata: Markov modeling [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 34: 207-216.
- [37] Matthews R B, Gilbert N G, Roach A, et al. Agent-based land-use models: A review of applications [J]. *Landscape Ecology*, 2007, 22(10): 1447-1459.
- [38] Tayyebi A, Pijanowski B C, Tayyebi A H. An urban growth boundary model using neural networks, GIS and radial parameterization: An application to Tehran, Iran [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 100(1-2): 35-44.
- [39] Huang B, Xie C L, Tay R. Support vector machines for urban growth modeling [J]. *GeoInformatica*, 2010, 14(1): 83-99.
- [40] Wu N, Silva E. Artificial intelligence solutions for urban land dynamics: A review [J]. *Journal of Planning Literature*, 2010, 24(3): 246-265.
- [41] Hayek U W, Wirth T, von Neuenschwander N, et al. Organizing and facilitating Geodesign processes: Integrating tools into collaborative design processes for urban transformation [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2016, 156: 59-70.
- [42] Heppenstall A J, Crooks A T, See L M, et al. Agent-based models of geographical systems [M]. Berlin, Germany: Springer Science and Business Media, 2012: 10-50.
- [43] Zhou Q Q, Leng G Y, Su J H, et al. Comparison of urbanization and climate change impacts on urban flood volumes: Importance of urban planning and drainage adaptation [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 658: 24-33.
- [44] Zhang X, Geng Y, Shao S, et al. China's non-fossil energy development and its 2030 CO₂ reduction targets: The role of urbanization [J]. *Applied Energy*, 2020, 261: 114353. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114353.
- [45] Wang Y F, Ni Z B, Chen S Q, et al. Microclimate regulation and energy saving potential from different urban green infrastructures in a subtropical city [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 226: 913-927.
- [46] Wu J S, Zheng H Q, Zhe F, et al. Study on the relationship between urbanization and fine particulate matter (PM_{2.5}) concentration and its implication in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 182: 872-882.
- [47] Chai L W, Huang M K, Fan H, et al. Urbanization altered regional soil organic matter quantity and quality: Insight from excitation emission matrix (EEM) and parallel factor analysis (PARAFAC) [J]. *Chemosphere*, 2019, 220: 249-258.
- [48] Song Y M, Chen B, Kwan M P. How does urban expansion impact people's exposure to green environments? A comparative study of 290 Chinese cities [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 246: 119018. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119018.
- [49] Guo L J, Liu R M, Men C, et al. Quantifying and simulating landscape composition and pattern impacts on land surface temperature: A decadal study of the rapidly urbanizing city of Beijing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 654: 430-440.
- [50] Yang J, Sun J, Ge Q S, et al. Assessing the impacts of ur-

- banization-associated green space on urban land surface temperature: A case study of Dalian, China [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017, 22: 1-10.
- [51] Fang C L, Cui X G, Li G D, et al. Modeling regional sustainable development scenarios using the urbanization and eco-environment coupler: Case study of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 689: 820-830.
- [52] Jiao M Y, Hu M M, Xia B C. Spatiotemporal dynamic simulation of land-use and landscape-pattern in the Pearl River Delta, China [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 49: 101581. doi: 10.1016/j.scs.2019.101581.
- [53] Xu C, Haase D, Pauleit S. The impact of different urban dynamics on green space availability: A multiple scenario modeling approach for the region of Munich, Germany [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 1-12.
- [54] Häußermann H, Siebel W. *Die Schrumpfende Stadt und die Stadtsoziologie* [M]. Wiesbaden, Germany: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 1988: 70-98.
- [55] 杨东峰, 殷成志. 如何拯救收缩的城市: 英国老工业城市转型经验及启示 [J]. *国际城市规划*, 2013, 28(6): 50-56. [Yang Dongfeng, Yin Chengzhi. How to save the shrinking cities: Old industrial cities' transition in the UK. *Urban Planning International*, 2013, 28(6): 50-56.]
- [56] 吴康, 李耀川. 收缩情境下城市土地利用及其生态系统服务的研究进展 [J]. *自然资源学报*, 2019, 34(5): 1121-1134. [Wu Kang, Li Yaochuan. Research progress of urban land use and its ecosystem services in the context of urban shrinkage. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(5): 1121-1134.]
- [57] Peng J, Ma J, Du Y Y, et al. Ecological suitability evaluation for mountainous area development based on conceptual model of landscape structure, function, and dynamics [J]. *Ecological Indicators*, 2016, 61(Part 2): 500-511.
- [58] 常青, 王仰麟, 李双成. 中小城镇绿色空间评价与格局优化: 以山东省即墨市为例 [J]. *生态学报*, 2006, 27(9): 3701-3710. [Chang Qing, Wang Yanglin, Li Shuangcheng. Green space spatial assessment and pattern optimization for towns: A case study of Jimo in Shandong Province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 27(9): 3701-3710.]
- [59] Costanza R, Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Nature*, 1997, 387: 253-260.
- [60] Smeets E, Weterings R. *Environmental indicators: Typology and overview* [R]. EEA Technical Report No. 25. Copenhagen, Denmark: European Environment Agency, 1999.
- [61] 傅伯杰, 于丹丹, 吕楠. 中国生物多样性与生态系统服务评估指标体系 [J]. *生态学报*, 2017, 37(2): 341-348. [Fu Bojie, Yu Dandan, Lv Nan. An indicator system for biodiversity and ecosystem services evaluation in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(2): 341-348.]
- [62] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法 [J]. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 911-919. [Xie Gaodi, Zhen Lin, Lu Chunxia, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(5): 911-919.]
- [63] Elmqvist T, Fragkias M, Goodness J, et al. *Urbanization, biodiversity and ecosystem services: Challenges and opportunities* [M]. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2013: 75-61.
- [64] 邬建国. 景观生态学: 概念与理论 [J]. *生态学杂志*, 2000, 19(1): 42-52. [Wu Jianguo. *Landscape ecology-concepts and theories*. *Chinese Journal of Ecology*, 2000, 19(1): 42-52.]
- [65] 韩依纹, 戴菲. 城市绿色空间的生态系统服务功能研究进展: 指标、方法与评估框架 [J]. *中国园林*, 2018, 34(10): 61-66. [Han Yiwen, Dai Fei. Review of study on ecosystem services function of urban green spaces: Indicators, methods and assessment framework. *Chinese Landscape Architecture*, 2018, 34(10): 61-66.]
- [66] Martínez-Harms M J, Balvanera P. Methods for mapping ecosystem service supply: A review [J]. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 2012, 8(1-2): 17-25.
- [67] Bingham G, Bishop R, Brody M, et al. Issues in ecosystem valuation: Improving information for decision making [J]. *Ecological Economics*, 1995, 14(2): 73-90.
- [68] Xu L Y, You H, Li D H, et al. Urban green spaces, their spatial pattern, and ecosystem service value: The case of Beijing [J]. *Habitat International*, 2016, 56: 84-95.
- [69] Abram N K, Meijaard E, Ancrenaz M, et al. Spatially explicit perceptions of ecosystem services and land cover change in forested regions of Borneo [J]. *Ecosystem Services*, 2014, 7: 116-127.
- [70] Georgescu M, Morefield P E, Bierwagen B G, et al. Urban adaptation can roll back warming of emerging metropolitan regions [J]. *PNAS*, 2014, 111: 2909-2914.
- [71] Cai Y B, Chen Y H, Tong C. Spatiotemporal evolution of urban green space and its impact on the urban thermal environment based on remote sensing data: A case study of Fuzhou City, China [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, 41: 333-343.
- [72] Masoudi M, Tan P Y. Multi-year comparison of the ef-

- fects of spatial pattern of urban green spaces on urban land surface temperature [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 184: 44-58.
- [73] Du H Y, Cai Y L, Zhou F Q, et al. Urban blue-green space planning based on thermal environment simulation: A case study of Shanghai, China [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 106: 105501. doi: 10.1016/j.ecolind.2019.105501.
- [74] Chen M, Dai F, Yang B, et al. Effects of urban green space morphological pattern on variation of PM_{2.5} concentration in the neighborhoods of five Chinese megacities [J]. *Building and Environment*, 2019, 158: 1-15.
- [75] Ren Z B, Zheng H F, He X Y, et al. Changes in spatio-temporal patterns of urban forest and its above-ground carbon storage: Implication for urban CO₂ emissions mitigation under China's rapid urban expansion and greening [J]. *Environment International*, 2019, 129: 438-450.
- [76] 俞孔坚, 王春连, 李迪华, 等. 水生态空间红线概念、划定方法及实证研究 [J]. *生态学报*, 2019, 39(16): 5911-5921. [Yu Kongjian, Wang Chunlian, Li Dihua, et al. The concept, methodology and a case study in defining the ecological redline for the hydroecological space. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(16): 5911-5921.]
- [77] Zhang B, Xie G D, Li N, et al. Effect of urban green space changes on the role of rainwater runoff reduction in Beijing, China [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 140: 8-16.
- [78] Schuch G, Serrao-Neumann S, Morgan E, et al. Water in the city: Green open spaces, land use planning and flood management: An Australian case study [J]. *Land Use Policy*, 2017, 63: 539-550.
- [79] Nouri H, Borujeni S C, Hoekstra A Y. The blue water footprint of urban green spaces: An example for Adelaide, Australia [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 190: 103613. doi: 10.1016/j.landurbplan.2019.103613.
- [80] Sandström U G, Angelstam P, Mikusiński G. Ecological diversity of birds in relation to the structure of urban green space [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 77 (1-2): 39-53.
- [81] Hess G R, King T J. Planning open spaces for wildlife: I. Selecting focal species using a Delphi survey approach [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2002, 58(1): 25-40.
- [82] Coombes E, Jones A P, Hillsdon M. The relationship of physical activity and overweight to objectively measured green space accessibility and use [J]. *Social Science and Medicine*, 2010, 70(6): 816-822.
- [83] Ghimire R, Ferreira S, Green G T, et al. Green space and adult obesity in the United States [J]. *Ecological Economics*, 2017, 136: 201-212.
- [84] Sun X, Crittenden J C, Li F, et al. Urban expansion simulation and the spatio-temporal changes of ecosystem services: A case study in Atlanta Metropolitan area, USA [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 622- 623: 974-987.
- [85] Massoni E S, Barton D N, Rusch G M, et al. Bigger, more diverse and better? Mapping structural diversity and its recreational value in urban green spaces [J]. *Ecosystem Services*, 2018, 31(Part C): 502-516.
- [86] McDonald R I, Urban D L. Spatially varying rules of landscape change: Lessons from a case study [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 74(1): 7-20.
- [87] Hao R F, Yu D Y, Liu Y P, et al. Impacts of changes in climate and landscape pattern on ecosystem services [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 579: 718-728.
- [88] Xu X G, Cui C W, Xu L F, et al. Method study on relative assessment for ecosystem service: A case of green space in Beijing, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 68(7): 1913-1924.
- [89] 胡忠秀, 周忠学. 西安市绿地生态系统服务功能测算及其空间格局研究 [J]. *干旱区地理*, 2013, 36(3): 553-561. [Hu Zhongxiu, Zhou Zhongxue. Ecosystem services evaluation and its spatial pattern analysis of urban green land in Xi'an City. *Arid Land Geography*, 2013, 36(3): 553-561.]
- [90] 陈康林, 龚建周, 刘彦随, 等. 近35年来广州城市绿色空间及破碎化时空分异 [J]. *自然资源学报*, 2016, 31(7): 1100-1113. [Chen Kanglin, Gong Jianzhou, Liu Yansui, et al. The spatial-temporal differentiation of green space and its fragmentation during the past thirty-five years in Guangzhou. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(7): 1100-1113.]
- [91] Li B J, Chen D X, Wu S H, et al. Spatio-temporal assessment of urbanization impacts on ecosystem services: Case study of Nanjing City, China [J]. *Ecological Indicators*, 2016, 71: 416-427.
- [92] 李莹莹, 黄成林. 快速城市化背景下上海绿色空间时空动态演变 [J]. *安徽农业大学学报*, 2017, 44(1): 87-93. [Li Yingying, Huang Chenglin. The spatio-temporal dynamics of the green space and landscape in rapidly urbanizing Shanghai. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2017, 44(1): 87-93.]
- [93] Pascual U, Balvanera P, Diaz S, et al. Valuing nature's contributions to people: The IPBES approach [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2017, 26-27: 7-16.
- [94] Ramya R, Ramyar A, Kialashaki Y, et al. Exploring re-configuration scenarios of high-density urban neighbor-

- hoods on urban temperature: The case of Tehran (Iran) [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, 44: 126398. doi: 10.1016/j.ufug.2019.126398.
- [95] 刘世梁, 武雪, 朱家骞, 等. 耦合景观格局与生态系统服务的区域生态承载力评价 [J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(5): 694-704. [Liu Shiliang, Wu Xue, Zhu Jiali, et al. Evaluation of regional ecological carrying capacity coupling with landscape pattern and ecosystem services. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(5): 694-704.]
- [96] 喻忠磊, 张文新, 梁进社, 等. 国土空间开发建设适宜性评价研究进展 [J]. *地理科学进展*, 2015, 34(9): 1107-1122. [Yu Zhonglei, Zhang Wenxin, Liang Jinshe, et al. Progress in evaluating suitability of spatial development and construction land. *Progress in Geography*, 2015, 34(9): 1107-1122.]
- [97] 蒋佳佳, 邵景安, 谭少军, 等. 重庆两江新区低丘缓坡开发建设生态适宜性评价 [J]. *地理研究*, 2019, 38(6): 1403-1419. [Jiang Jiajia, Shao Jing'an, Tan Shaojun, et al. Evaluation on ecological suitability for development and construction of gentle hillside in Liangjiang New Area. *Geographical Research*, 2019, 38(6): 1403-1419.]
- [98] 王向东, 刘小茜, 裴韬, 等. 基于技术效率测算的京津冀城市土地集约利用潜力评价 [J]. *地理学报*, 2019, 74(9): 1853-1865. [Wang Xiangdong, Liu Xiaoqian, Pei Tao, et al. Potential evaluation of urban land intensive use in Beijing-Tianjin-Hebei region based on measurement of technical efficiency. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(9): 1853-1865.]
- [99] 沈春竹, 谭琦川, 王丹阳, 等. 基于资源环境承载力与开发建设适宜性的国土开发强度研究: 以江苏省为例 [J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(6): 1276-1286. [Shen Chunzhu, Tan Qichuan, Wang Danyang, et al. Research on land development intensity based on carrying capacity of resources and environment and suitability of development and construction: A case study of Jiangsu. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(6): 1276-1286.]
- [100] 成超男, 胡凯富, 关海莉, 等. 基于景观生态安全格局的北京市通州新区生态园林绿地系统空间结构研究 [J]. *中国城市林业*, 2017, 15(4): 41-45. [Cheng Chaonan, Hu Kaifu, Guan Haili, et al. Spatial structure analysis of ecological garden green space system of new Tongzhou District based on landscape ecological security pattern. *Journal of Chinese Urban Forestry*, 2017, 15(4): 41-45.]

Progress and prospect of the spatiotemporal change and ecosystem services evaluation of urban green space pattern

CHENG Chaonan¹, HU Yang², ZHAO Ming^{1*}

(1. School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Scientific and reasonable urban green space layout is an important guarantee of urban sustainable development. The research on the spatiotemporal change of urban green space pattern and its influencing factors could reveal its complex relationship with various factors and processes of urbanization to facilitate improvement of the function of ecosystem services of urban systems. In the context of ecological civilization construction, urban green space will play an important role in multi-scale territorial spatial planning, but how to combine them remains a challenge. Therefore, based on a review of the definition and development of urban green space patterns, we discussed the research progress of the spatiotemporal change, driving factors, scenario simulation, and optimization strategies of urban green space patterns. We also summarized the application of ecosystem services in urban green space evaluation. Finally, we explored the evaluation and optimization framework of urban green space patterns in the territorial spatial planning system, with a view of providing a reference for urban green space planning in the new era.

Keywords: urban green space pattern; spatiotemporal change; ecosystem services; territorial spatial planning