

DOI: 10.5846/stxb202208032215

冯一凡, 冯君明, 李 翹. 生态韧性视角下绿色空间时空演变及优化研究进展. 生态学报, 2023, 43(14): 5648-5661.

Feng Y F, Feng J M, Li C. Progress of the spatiotemporal change and improvement of green space from the perspective of ecological resilience. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(14): 5648-5661.

生态韧性视角下绿色空间时空演变及优化研究进展

冯一凡, 冯君明, 李 翹*

北京林业大学园林学院, 北京 100083

摘要:在快速城镇化以及全球气候变化的背景下,城市面临着严重的生态环境挑战。如何提升生态系统韧性,增强城市抵抗内外干扰的能力对区域可持续发展至关重要,已引起学界及社会各界的高度重视。绿色空间是协调生态环境与城乡发展的重要抓手,也是落实生态韧性提升的重要载体,结构完整、功能完善的绿色空间能够有效提升城市应对环境风险的能力。因此,在梳理多学科背景下绿色空间研究视角与研究内容的基础上,阐述绿色空间时空演变、驱动机制、情景模拟等方面的研究进展。此外,基于对生态韧性理论发展历程以及国内外相关研究的梳理,总结不同尺度下以生态韧性提升为导向的绿色空间优化路径,探讨各尺度绿色空间生态韧性分析及优化与现行绿地系统规划、国土空间规划体系的衔接。最后,对比国内外研究进展,提出国内未来研究应更加关注多层次生态韧性评价体系构建、社会-生态系统的整体分析以及阈值视角下不同生态韧性绿色空间的分区治理,以期扩展绿色空间规划与建设的思路,助力自然和社会空间的协调配合与共同发展。

关键词:绿色空间优化;生态韧性;时空演变;绿地系统规划;国土空间规划

Progress of the spatiotemporal change and improvement of green space from the perspective of ecological resilience

FENG Yifan, FENG Junming, LI Chi*

School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Due to the rapid development of urbanization and the continuous change of global climate, cities are faced with seriously ecological and environmental challenges. How to improve the resilience of the ecosystem and enhance the ability of resisting internal and external interference of cities are crucial to regional sustainable development. Ecological resilience represents the ability of ecosystem to recover to a stable state after being disturbed. With the increasing concern for sustainable development, ecological resilience has become an important issue. Green space is important for coordinating environment protection and urban development, and is also the significant carrier of ecological resilience. Green space with complete structure and perfect functions can help cities to cope with the environmental risks, improving the ecological resilience of cities. This paper reviewed the research content of green space from the multidisciplinary perspective, discussed the research progress of spatiotemporal evolution characteristics, driving mechanism, and scenario simulation of green space. Then, based on the review of the development process of ecological resilience theory and related research progress, the green space optimization strategies from the perspective of ecological resilience were summarized. The optimization strategies were explored on macroscopic, middle, and microscopic three aspects. Macroscopic researches involved the overall structure and service capacity of green space at the regional scale such as urban agglomerations and watersheds. The middle scale researches were concerned with the improvement of the quality and anti-interference ability of

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51978050);国家住房与城乡建设部科学技术计划项目(2020-k-194)

收稿日期:2022-08-03; **网络出版日期:**2023-03-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lichibj@bjfu.edu.cn

urban green space. The studies were based on the analysis of urban green space network optimization, green space land demand calculation, greenway system classification planning and green infrastructure configuration. Microscopic researches focused on the design guidance of specific green spaces like park and square. Reduce the vulnerability of green space by improving the capacity of stormwater management, improving the quality of habitats, and increasing biodiversity. This paper also explored the integration of ecological resilience study and green space system planning. We tried to construct a mechanism of strategy-feedback interaction between Green Space Planning and ecological resilience analysis. Further, the methods of combining the Territorial Spatial Planning with the ecological resilience analysis were discussed. The analysis could be integrated into the multi scale and multi type plannings, providing scientific support for Territorial Spatial Planning. Finally, this paper proposed three advices for the further researches in China: improving the multi-level ecological resilience evaluation system, strengthening the overall analysis of social-ecosystem, exploring the division treatment of green space with different ecological resilience from the perspective of thresholds.

Key Words: green space improvement; ecological resilience; spatiotemporal evolution; green space system planning; territorial spatial planning

随着城市化的不断推进,环境危机与生态退化等问题日益严重,城市用地的扩张导致生态用地被破坏、绿色空间格局破碎、生物多样性降低等一系列生态环境问题^[1]。随之而产生的生态风险造成了生态系统韧性不断下降,制约着区域及城市的可持续发展^[2]。如何提升城市的生态韧性水平,增强生态系统对外部干扰的消解与吸收能力^[3],已成为高质量发展背景下实现区域可持续发展亟需解决的重要议题。生态韧性的测度与评价能够识别生态风险影响较大、韧性较低的脆弱地区,为生态系统的结构优化与要素完善提供决策依据。通过生态韧性的定量分析划定合理的生态空间需求量,有助于权衡国土空间保护与开发的关系,推动三生空间的协同可持续发展。

绿色空间涵盖有城市绿地、林地、草地、农田、水域等生态空间^[4-6],既包括城市建设用地内公园绿地等在内的绿色空间,又涉及建设用地之外对自然生态环境、人居环境以及城市生产环境等具有重要影响的绿色环境载体^[7-8]。绿色空间是协调生态环境与区域发展的重要抓手,也是落实国土空间规划中有关自然保护和生态修复等相关规划策略的空间载体。城市高质量发展的目标对绿色空间的发展提出了更高的要求,优化绿色空间格局、提升其功能价值对改善生态环境、增进民生福祉具有重要意义,近年来学界对绿色空间的关注度也不断提高,不同领域的学者基于不同的研究视角从多个方面对绿色空间的结构布局^[9]、服务功能^[10]以及与公众健康^[11]、经济发展^[12]的耦合关系进行探究。绿色空间时空演变以及驱动机制的相关研究是众多研究的基础,该研究能够厘清城市空间人类活动与生态环境变迁之间的相互关系,有助于构建区域协调、城乡融合的高质量生态空间^[13]。随着城市的发展由“增量扩张”的粗放式发展向“存量挖潜”的集约式发展的转型^[14],绿色空间景观格局的动态演化与生态环境问题的交叉研究成为了研究的热点方向^[15]。本文梳理了绿色空间时空演变及驱动机制的研究进展及研究方法,归纳生态韧性导向下不同尺度绿色空间的优化策略,并探讨绿色空间生态韧性的分析及评估与绿地系统规划、国土空间规划体系的衔接方式,以为绿色空间的后续研究提供思路引导与方法借鉴。

1 绿色空间时空演变相关研究进展

1.1 绿色空间概念界定及多学科视角下的研究内容

绿色空间是城市生态系统的重要组成部分,具有调节气候、净化环境、维持生物多样性及改善公共健康、提供休闲娱乐场所等重要功能^[16-17],在保护城市生态环境方面发挥重要作用^[18]。基于不同的研究目的,国内外学者对绿色空间的定义有所区别。国外学者对绿色空间的定义始于开放空间^[19],后与绿地的广义概念相结合,认为绿色空间是维护城市“新陈代谢”以及可持续发展的重要绿色基础设施^[20],能够提供多种生态服务

功能^[21]。国内对于绿色空间的界定由狭义的城市绿地向涵盖园林绿地、城市森林、立体空间绿化、都市农田和水域湿地等在内的绿色网络系统转变^[6]。随着国土空间规划中“三生空间”的分区管控与治理,城区园林绿地空间与郊区自然生态空间的区域边界逐渐被打破^[22]。

综合国内外对于绿色空间的定义,结合当前国内区域协同发展以及国土空间规划的需求,本研究将绿色空间定义为:受自然因素与城市环境的共同影响^[4,23],覆盖有植被、水体等自然要素^[16,24],具有生态、游憩、景观、文教、防灾等多种生态系统服务功能和价值的绿化用地网络^[6,25–26]。涵盖国土空间三生空间中的生态空间以及生产、生活空间中具有生态环境保护、游憩康体休闲等功能的用地,具体包括城市绿地、林地、草地、农田、湿地及水域^[4–5]。区别于开放空间,绿色空间包括了建成区内的绿化环境以及建成区外的城市生态空间^[27],具有更大的规模范围。相较于绿色基础设施,绿色空间在关注网络结构连接性与功能多功能性的同时,也注重对于生态、经济、景观以及人居等多重效益的激发与提升^[28]。

绿色空间的研究跨越城乡规划、风景园林学、生态学、地理学以及社会科学和健康研究等多个学科。各学科从自身的理论基础与研究方法出发,提出了不同的绿色空间研究视角与研究内容(表1)。城乡规划与风景园林学等建成环境学科侧重于绿色空间的格局演变、优化以及规划管控体系的支撑。生态学、地理学、水利工程相关学科等偏重自然科学类学科对于绿色空间的研究多聚焦于其生态功能的测度、生态安全格局的构建与模拟以及时空演变驱动机制的研究等。心理学、社会学、经济学等偏重社会科学类的学科将绿色空间与心理健康、经济价值及地区发展相结合,探究绿色空间的多重价值及不同功能导向绿色空间的分布与发展规律。绿色空间的研究具有丰富的学科背景,也有着多专业协作的趋势与要求。交叉融合的多学科能够为区域绿色空间优化、解决生态环境问题提供新的视角与思路。

表 1 多学科视角下的绿色空间研究内容

Table 1 Research content of green space from a multidisciplinary perspective

学科 Subjects	研究视角 Research perspectives	研究内容 Research contents
城乡规划/风景园林学 Urban planning/Landscape architecture	景观格局演变	景观格局的动态演化及时空分异特征 ^[29–30]
	绿色空间格局优化	绿色空间布局的合理性与宜居性 ^[31] 、绿色生态网络体系及游憩体系的构建 ^[32]
	绿色空间规划与管控体系	绿色空间的建设与管控途径 ^[33] 、绿地系统规划与整体空间规划及国土空间规划的衔接 ^[34]
生态学/环境科学 Ecology/Environmental Science	生态系统服务功能	生态系统服务价值评估 ^[35] 、生态系统服务流 ^[10] 、多情景模拟及预测分析 ^[36]
	绿色空间对小气候的适应及影响	绿色空间调节微气候 ^[37–38] 、缓解大气污染 ^[39] 、实测及情景模拟 ^[40]
地理学 Geography	不同尺度绿色空间时空分异特征	绿色空间的可达性分析 ^[41] 、空间分布规律及时间维度的演进特征 ^[9]
	绿色空间演进机制	自然、社会、经济、政策等因素对绿色空间 ^[42] 演变的驱动强度与驱动机制 ^[13]
水利工程 Water conservancy engineering	绿色空间对水文安全与区域韧性的调节作用	绿色空间缓解雨水径流 ^[43] ,有助于海绵城市的构建,提升区域韧性 ^[44]
心理学/健康相关学科 Psychology/ Subjects concerned with health	绿色空间与心理健康、公众健康的关联性	绿色空间调节公众身心压力的作用 ^[45] ,有利于心理康复 ^[46] ,一定程度上预防疾病的传播与传染 ^[11]
社会学/经济学 Sociology/ Economics	绿色空间分布与地区经济发展的耦合关系	绿色空间分布公平性 ^[47] 、绿色空间经济绩效评估 ^[48] 、区域经济发展与绿色空间分布 ^[12] 的关联性 ^[49–50]

1.2 绿色空间格局时空演变评价研究进展

区域及城市绿色空间在自然与社会的相互作用共同影响下,其空间格局在时间序列上呈动态演进的特征^[51]。绿色空间格局时空动态的研究运用定性与定量结合的研究方法把脉绿色空间的变化规律,对绿色空间要素配置、结构优化以及高质量发展具有重要的指导作用。

多时相的遥感影像能够反映土地覆盖的动态变化,并为预测模拟提供基础,是必不可少的重要数据集^[52]。基于遥感技术及地理信息系统,国内外学者采用不同的分类方法提取城市绿色空间数据。以 Landsat 影像为基础,通过最大似然法结合目视解译^[53]、随机森林分类^[54]、支持向量机(SVM)分类^[55]、神经网络分类^[56]等方法提取各地类信息。由于城市环境在空间和光谱特性方面具有异质性和复杂性,各类遥感信息提取分类方法仍需结合野外调查以及相关资料进行辅助,提高数据精确性与研究准确性。

绿色空间格局时空演变包括类型的转换以及形态、空间分布的变化。现有研究多利用土地利用转移矩阵分析土地利用的变化,结合动态度^[5]、时空信息熵^[57]等指标定量描述不同尺度绿色空间动态变化特征,运用莫兰指数(Moran's I)^[39]、冷热点分析^[4]等空间聚类分析方法刻画各类绿色空间分布特征。最后,综合定量与定性分析的结果,总结不同尺度绿色空间的时空演变规律。此外,绿色空间的生态功能与空间结构之间的耦合关系,是近年来国内外的热点研究问题。国内外学者结合景观格局指数以及形态学空间格局分析方法(MSPA)深入刻画了绿色空间格局与形态特征^[58-60]。

1.3 绿色空间格局演变驱动机制分析技术方法

(1) 驱动因子选取

绿色空间演变的驱动因素主要包括自然环境、社会经济以及政策法规三大类。自然环境因素包括高程、植被覆盖度、年降雨量、年平均气温、土壤类型等^[23,61]。社会经济方面多选取人口密度、地区生产总值、人均国内生产总值(GDP)、人均可支配收入、建成区面积比例、第一产业产值比例、第二产业产值比例、第三产业产值比例等因子^[4,23,61-62]。政策相关的影响因素多起到规划调整作用,难以纳入量化分析中,现有研究多结合绿色空间时空演进过程进行定性分析。

当初选因子较多时,解释因变量过程中易出现多重共线性。为保证各因子间的非共线性,研究者多在研究初期通过主成分分析方法融合相似因子或通过 SPSS 软件进行共线性判断,剔除共线性较强的因子。之后,结合 Pearson 相关系数^[63]、地理探测器^[64]、灰色关联度^[65]等分析对各因子的驱动强度进行判断,去除相关性较弱的因子,保证后期构建模型对因变量的解释力。

(2) 驱动机制识别

为探讨区域绿色空间时空演进的驱动机制,国内外学者多采用非空间的回归模型以及空间计量模型进行分析。最小二乘法(OLS)是常用的线性回归模型。但因绿色空间格局的演变具有空间自相关性,该模型无法满足残差项独立的假设^[13],不适用于对空间关系的分析^[4]。因此,研究多结合空间计量模型探究绿色空间格局在空间上的差异化响应特征。常用的空间计量模型有空间滞后模型(SLM)和空间误差模型(SEM),运用拉格朗日乘子法对两种模型结构进行选择^[4]。偏最小二乘回归模型(PLSR)是一种广泛适用的多元统计分析方法,具有主成分分析、典型相关分析和线性回归分析等方法的特点^[66]。该模型基于信息重组,在消除因子共线性的同时能够保证模型的稳定性^[67],在绿色空间演进驱动机制研究中广泛应用。

(3) 驱动空间定位

地理加权回归模型(GWR)引入了空间距离权重,避免了空间自相关、异质性和非平稳性等问题^[68],适用于具有空间相关性的数据分析。与 OLS 结合,进行驱动力分析^[69]。时空地理加权回归模型(GTWR)在 GWR 模型基础上引入了时间维度,不仅把时间和空间特征作为回归分析的影响因素,而且考虑了用地变化的时空非平稳性特征^[70],能够结合空间分布全面解读绿色空间变化的驱动机制。

1.4 绿色空间发展的情景模拟相关进展

绿色空间的发展具有动态化与复杂化的特征,基于多种规划开发目标决策的情景模拟能够将不同的发展目标转换为不同的约束条件,通过数学模型量化各要素对于绿色空间的影响力,结合存量规模与驱动机制模拟绿色空间未来发展的多种可能性^[71-72]。预测模拟有助于提高规划者对于绿色空间系统动态过程的理解,多情景的综合比较便于获得经济社会与生态环境协调发展的最佳方案。

近年来,国内外学者围绕绿色空间时空变化的预测开展了广泛研究,构建出多种预测模型,整体可分为定

量模拟模型和空间分配模拟模型两类。定量模拟模型侧重于绿色空间数量变化及扩张速率的预测,常用模型有系统动力学模型(SD)、马尔科夫模型(Markov)、人工神经网络模型(ANN)等。空间分配模拟模型侧重于绿色空间分布与景观格局变化,常用模型有元胞自动机(CA)、土地利用变化效应模型(CLUE-S)、多智能体模型(ABM)、未来土地利用模拟模型(FLUS)^[73]、机器学习算法^[74]等。两种类型预测模型因输入数据及运算方式不同而存在各自的优势与局限。如系统动力学模型能够表达非线性因果循环关系、信息反馈和随时间变化的复杂动态问题,但无法处理空间数据并充分描述用地变化的空间过程^[75]。Markov模型对时间序列的预测推演具有优势,但对空间层面的时空模拟较为困难。ANN模型能够模拟变量间非线性映射关系,但因网络结构选择不同存在局部及极小化等问题^[76]。CA模型能有效模拟复杂系统的动态变化,适用性较广,但运算具有一定的随机性,定量模块与空间分配模块耦合较为松散,缺乏反馈^[77]。FLUS模型将ANN模型与加入了自适应惯性竞争机制的CA模型进行耦合改进^[78],能够有效提高空间模拟的精度,但对演变需求方面的分析有待于进一步改善。

为突破单一模拟模型的局限性,研究不断改善定量模拟与空间分配模拟之间的反馈关系,开发出一系列耦合模型。其中,CA模型与SD模型^[75,79]、ANN模型^[80]、Markov模型^[76,81]等耦合,结合了定量模拟模型的变化概率预测优势与空间分配模拟模型在空间维度的预测优势。SD模型耦合FLUS模型,实现了自上而下的宏观面积需求预测与自下而上的微观空间模拟的结合^[82]。

目标场景的拟定是绿色空间动态预测的约束条件,通常以官方报告或政策导向为依据,对一些有合理性的可能事件在未来的呈现态势进行假设^[5]。生物多样性和生态系统服务政府间科学政策平台(IPBES)在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》中将目标场景划分为探索型情景、目标寻求情景和政策筛选型情景^[83]。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)提出共享经济路径(SSPs),主要包括5种模拟情景:可持续路径(SSP1)、中间路径(SSP2)、区域竞争路径(SSP3)、不均衡路径(SSP4)和化石燃料发展路径(SSP5)^[84],分别对应不同的城市发展趋势。此外,对照区域及城市规划发展纲要的要求,学者们限定部分土地类型间的转换概率并增强相关驱动因素的影响力,模拟特定导向下的城市发展。夏楚瑜等结合2017年《杭州市总体城市设计修编(草案)》所提出的未来城市定位设置了基准情景和“创新天堂”情景^[73]。邵壮等根据《北京城市总体规划(2016—2035年)》中关于城市扩张提出的要求,设置了自然演变情景(NES)、人口疏解城市发展情景(PDUDS)、绿色集约生态保护情景(GIEPS)三种情景模式^[85]。

综上所述,目前关于绿色空间空间格局的研究已形成了时空演变分析、驱动机制探究、情景模拟预测的研究框架。多样的学科背景、多源的数据以及多维度的分析方法不断拓展绿色空间演变分析的广度与深度。绿色空间时空演变评价与驱动机制的研究越来越关注生态功能与绿色空间之间的耦合关系,在抽象化的机制研究基础上强化驱动空间的落位,增强了对具体绿色空间优化的指导意义。多类型的预测模型与多目标的情景模拟也有利于准确把脉绿色空间的未来发展趋势。现有关于绿色空间格局评价与优化的研究整体较为成熟,但关于绿色空间格局优化的研究更多的是基于结构性的生态网络构建,缺乏对生态阈值视角下绿色空间需求量的定量分析及不同功能属性空间的定性判断,绿色空间数量体系、空间格局、要素配置的整体科学量测与优化有待深入。

2 生态韧性在绿色空间研究中的应用进展

2.1 生态韧性视角下的绿色空间相关研究

韧性的原始含义是恢复并回到原始状态^[86],20世纪70年代,韧性的概念首次应用于生态系统,最初指的是生态系统在受到干扰后恢复其原始状态的能力^[87],后来逐渐发展为生态系统吸收干扰,以及通过自身结构的变化恢复、适应并达到新的稳定状态的能力^[88]。“韧性”是英文“resilience”的中译词,国内学术界对resilience一词有着多种翻译,除“韧性”外,还经常翻译为弹性、恢复力,对国内相关文献的分析应考虑多种翻译情景。

生态韧性是生态系统受到扰动后恢复到稳定状态的能力^[87],具有尺度、适应能力、阈值和替代机制等多维属性^[89]。生态韧性的提升依托于生态系统各要素的合理配置以及科学完整的网络结构。广义上的绿色空间包含自然、人工多种类型的绿地及水体,能以一种缓和接纳与适应互动的方式来消解系统内外的压力,减少气候变化的影响和人类活动的干扰^[90]。绿色空间构筑了区域及城市发展的自然本底,体现出了不可忽视的生态韧性价值与属性特征,是生态韧性提升与可持续发展的重要抓手。随着气候变化与城镇化带来的生态风险不断加剧,生态韧性成为绿色空间研究的热点之一,相关研究数量整体呈上升趋势(图1)。

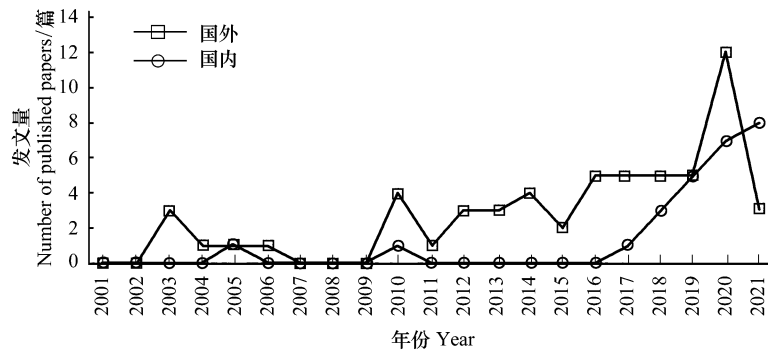


图1 生态韧性视角下绿色空间研究中/英文论文发表数量(2001—2021年)

Fig.1 The number of Chinese/English papers on green space from the perspective of ecological resilience from 2000 to 2021

中文论文来源于中国知网(CNKI)数据库;英文论文来源于“Web of Science”核心合集数据库

国外有关绿色空间生态韧性的研究起步较早,早期研究多聚焦生态韧性的评估^[91]、生态恢复基础理论的研究^[92]以及可持续利用政策管理的制定^[93],其中海洋生态系统^[94]以及森林生态系统^[95]是生态韧性的热点领域。随着研究的不断深入,研究对象逐渐由单一的生态系统拓展至涵盖城市的复合生态系统,对城市绿地系统^[96]及社区单元生态韧性^[97]的关注度也不断提高。研究重点也逐渐转向影响机制探究^[98]以及多情景模拟^[99]。

国内有关绿色空间生态韧性的研究兴起于2005年,整体起步较晚,侧重于应用基础研究。研究初期较关注灰色空间与村镇空间^[100],2018年后逐渐与开放空间、韧性城市等融合,注重营建策略与空间优化的研究^[101—102]。国内对于生态韧性与绿色空间结合的研究缺乏对阈值与尺度的深入研究,应耦合生态学的分析方法构建更为准确的多尺度定量化模型,深化绿色空间的生态韧性研究。

2.2 生态韧性测度与评价

生态韧性的测度与评价是众多研究的基础,对绿色空间的韧性优化起到重要的支撑作用。现有研究主要运用阈值法、替代法、模拟法、状态空间法等研究方法实现生态韧性的定量化评估。阈值法通常借助计算机模型、依据关键变量和时间阈值或生态阈值之间的关系估算系统从胁迫状态恢复稳定状态的时间^[103—104]。当难以对生态系统每个稳态的阈值进行直接测算时,可运用替代法选取便于测定的替代因子进行间接估算^[105]。模拟法基于对系统现阶段特征及驱动因素的分析,结合未来场景的模拟对系统生态韧性进行估算^[106]。状态空间法基于欧式几何空间对系统状态转换过程中状态空间承载点变化进行计算,实现对一定尺度内区域的不同承载状况的定量描述,多用于生态承载力评价等定量分析^[107]。

基于生态系统固有的复杂性以及生态韧性的多维度属性,学界形成了多样化的评价框架,涵盖定性和定量方法、参与性评估、统计分析、建模和度量等多个方面。传统的生态韧性测度侧重自然系统本身,较多关注自然扰动,通常与生态敏感性、生态风险的评估相结合^[108—110]。随着学界对城市社会-生态系统(SES)整体性关注度的不断提高,越来越多的研究将自然因素与人类活动的共同影响纳入生态韧性的测度与评价中。基于韧性的基本特征(抵抗力、适应力和恢复力)所构建的生态韧性评估模型应用较为广泛。夏楚瑜等结合该评估模型基于生态系统服务价值、生态系统恢复力以及景观异质性对杭州市城市生态韧性时空变化进行分

析^[73];陶洁怡等运用此评估模型分析长三角地区城市生态韧性的时空演变特征,并进一步探究了生态韧性影响因素的时空异质性^[111]。此外,王少剑等借鉴韧性城市的评估方法,构建了“规模-密度-形态”三维生态韧性评价体系,基于建成区范围与生态基础设施之间的比例关系、生态足迹与生态承载力比值以及“源-汇”两种景观的“平均距离数”对城市的生态韧性进行评价^[3,112]。

在区域一体化发展背景下,研究范围从单一生态系统单元逐渐扩展到区域、流域尺度。流域作为完整的地理单元,具有水资源流动的特征,描述和量化水供给服务的流动能力能够联结不同区域间生态系统服务的作用关系^[113],从而更有利于区域生态韧性的提升。随着黄河流域生态保护与高质量发展、长江流域绿色发展等重大战略的推进与实施,学界越来越关注对流域尺度生态空间与韧性的评价与分析^[114—115]。

综上所述,生态韧性的评价框架主要围绕景观生态学、韧性城市等相关理论与地理空间分析方法展开,因研究对象及目标不同而呈现多元化。为深入挖掘生态韧性的变化规律,学者们不断从时间、空间两个维度拓展生态韧性评价相关研究。目前对于生态韧性的量化主要集中于生态系统服务能力、生态承载力以及生态系统恢复力等指标的测算,人类活动产生的干扰主要基于城市规模、建设强度等进行量化,较少涉及到城市建设造成的环境污染、生物多样性降低、生境退化等不利影响,对社会-生态系统整体分析有待深入。

2.3 多尺度绿色空间的生态韧性提升路径

现有研究运用时间序列分析及空间建模工具,对绿色空间的生态韧性变化进行分析与模拟,并从绿色空间结构、要素配置以及管控政策三个方面提出优化策略,整体形成了规模量化-价值评价-格局分析-规划管控的逻辑链条^[116]。

针对不同尺度绿色空间的特征,学者们从宏观、中观、微观多个维度提出生态韧性提升路径(表2)。宏观层面的研究涉及城市群、流域等区域尺度下绿色空间整体结构及服务能力。研究基于形态空间格局分析模型与 InVEST 模型探讨区域生态安全格局的构建以及生态系统服务能力的评估,并结合情景预测模型估算生态系统服务价值的变化,提升区域整体生态韧性水平。中观层面的研究关注城市尺度下的绿色空间网络。城市绿色空间的生态韧性可通过生物多样性、多功能性、多尺度网络、模块化和适应性设计五个方面的优化改进得到提升^[132]。研究通过城市绿色空间网络优化、绿色空间用地需求测算、绿道体系分类规划以及绿色基础设施配置等方面的分析提升城市绿色空间的品质与抗干扰能力。微观层面的研究聚焦于建成区内公园、广场等具体绿色环境载体。研究关注具体绿色空间的设计引导,结合公园绿地等开放空间的设计与利用,结合水文分析、生境分析等模型与方法,提升绿地的雨洪调蓄能力以及提升生境质量、增加生物多样性,降低绿地的脆弱性。

综合宏观、中观和微观的研究方法与内容,可构建涵盖要素配置、结构优化的绿色空间生态韧性评估与优化体系,结合空间计量分析模型探讨各类绿色空间之间的权衡与协同关系,进一步指导相关管控策略的制定^[133]。为更好的统筹区域与城市中的生态资源,学者们构建了对绿色空间跨尺度分析与规划体系。Arthur 等从流域、街区、具体绿色空间三个尺度对绿色基础设施的可达性、连通性以及优化潜力进行了评估,提升休闲绿地的使用率、增强流域调蓄能力并改善生物多样性^[134]。Yamu 等结合多重分形理论对区域、城市、街区多尺度的设施服务、绿色空间可达性进行了模拟与评估,对城市整体形态与布局进行优化^[135]。在相关研究的不断推动下,全尺度的绿色空间规划体系也逐渐形成。德国绿色基础设施(GI)规划以自然生态环境保护和生态系统服务提升为目标,跨越联邦尺度、区域尺度以及城市尺度,在政策和法律体系的支撑下,形成了多层级的互惠反馈机制,实现全尺度绿色空间的规划与管制^[136]。

3 绿色空间生态韧性提升与规划体系的衔接

3.1 绿色空间的生态韧性提升为绿地系统规划提供依据

绿地系统规划是多尺度绿色空间系统规划的合集,对各类型城市绿地进行定性、定位、定量的统筹安排。住房和城乡建设部于 2019 年发布的《城市绿地系统规划标准》(GB/T51346—2019)将城市绿地系统划分为

城区绿地系统以及区域绿地系统两部分。韧性的生态系统应具备多样性、冗余性、鲁棒性、连通性、适应性等特性。因此,具有生态韧性的绿地系统应具备高质量的生境斑块、多层次的廊道连接、安全性的生态格局以及多功能的生态系统。生态韧性分析能够从多个角度切入绿地系统规划中,为各专项内容提供科学支撑。生态安全格局的构建以及生态系统服务评估能够识别区域内受生态风险影响较大的区域,在区域绿地系统规划中将生态风险较大区域纳入到生态保育型绿地中并设置生态控制线,加强对该类生态空间的整合与保护,筑牢区域发展的生态本底。城区绿地系统的整体结构应以安全性的生态格局为基础,结合生态率当量计算、生态适宜性分析以及生态连接度评价等进行绿色空间定量、定性、定位的分类布局与优化,为城区内公园绿地的统筹规划、类型划分以及布局优化提供依据。绿色空间生态韧性的分析与优化与绿地系统规划相辅相成,二者形成了“策略-反馈”的良性互动(图2)。一方面,生态韧性的测算与分析是绿地系统规划的重要依据,有助于构建抗干扰、适应力及恢复力强的韧性绿地网络。另一方面,公园体系、绿道体系、城区绿线以及区域绿地系统的合理布局与科学配置能够有效提升区域及城市的生态韧性,推动区域的可持续发展。

表2 生态韧性视角下多尺度绿色空间评价与优化研究总结

Table 2 Summary of multi-scale green space evaluation and optimization research from the perspective of ecological resilience

尺度 Scales	研究目的 Objectives	研究方法 Research methods	研究内容 Research contents
宏观 Macroscopic	构建区域生态安全格局	生态适宜性分析、形态学空间格局分析、景观连通性评价、生态稀缺度评价、最小路径法	结合景观生态学原理构建区域安全格局并通过“生态核心-绿色空间廊道-关键节点”体系实现优化 ^[117] 。运用形态学空间格局分析(MSPA)、景观连通性以及生态稀缺度评价筛选生态源地,耦合生态供需关系提取廊道并构建区域生态安全格局 ^[118] 。
	评估生态系统服务能力	InVEST模型、生态系统服务功能指标计算、CA-Markov等预测模型模拟	评估包括水源涵养、水土保持、生物多样性等多种生态系统服务价值并分析生态系统服务供需关系 ^[8] 。结合预测模型估算不同情景下生态系统服务价值的变化 ^[119] 。
中观 Middle	优化城市绿色空间网络	生态敏感性与适宜性评价、生态连通度评价、最小累积阻力模型、InVEST模型模拟	综合运用生态适宜性、敏感性和连通度评价对城市绿色空间总体布局进行调控 ^[120] 。基于生态学中的功能性连接等方法构建城市生态网络,优化绿地布局 ^[121] 。
	测算绿色空间用地需求	生态率当量计算、生态环境压力测算	基于生态绿当量的理论量化不同绿地空间的生态补偿能力,对土地利用结构进行生态优化 ^[122] 。通过生态环境压力测算模拟与评估生态用地的需求 ^[123] 。
	分类规划绿道体系	层次分析法(AHP)、空间聚类分析、重要性-绩效分析	识别关键生态系统服务并基于供需匹配原则对绿道分类规划 ^[124] 。结合生态系统服务评估优化城市河岸绿道的韧性规划 ^[125] 。
	完善绿色基础设施配置	脆弱性分析评估、空间句法分析、最小累积成本分析	基于性能监测以及脆弱性分析估算绿色基础设施对减轻城市热岛效应以及改善水质环境的效率 ^[126] 。整合沿海城市潜在的洪水疏散线路和绿色空间构建绿色基础设施网络,降低城市环境的脆弱性 ^[127] 。
微观 Microscopic	增强径流管理与雨洪调蓄能力	暴雨洪水管理模型(SWMM)水文分析、容积法与模型计算法	运用SWMM水文分析软件,借鉴基于自然的解决方案(NBS)在径流管理方面的应用,构建应对洪水的蓝绿空间体系 ^[128] 。从雨水传输系统、雨水径流调蓄系统以及水净化系统入手提升绿地的雨洪调蓄能力 ^[129] 。
	提升生境质量与生物多样性	MSPA景观要素分类、InVEST模型、SPSS显著性分析	基于MSPA-InVEST模型识别城市绿色空间并评价生境质量,进一步构建生境网络 ^[130] 。基于量化分析改善植物群落配置并优化土壤、改善生境,缓解城镇化发展与生态脆弱性之间的矛盾 ^[131] 。

3.2 绿色空间的生态韧性提升多层次融入国土空间规划

国土空间规划明确了“五级三类”的规划框架,绿色空间的韧性优化也应立足于多尺度、多类型的规划协同。宏观战略层面,着眼于国土空间全域全要素的风险识别、韧性评估是双评价的重要内容,能够实现大区域生态网络的格局与功能优化,为国土空间规划中“三区三线”的划定、国土空间综合治理与生态修复、自然保

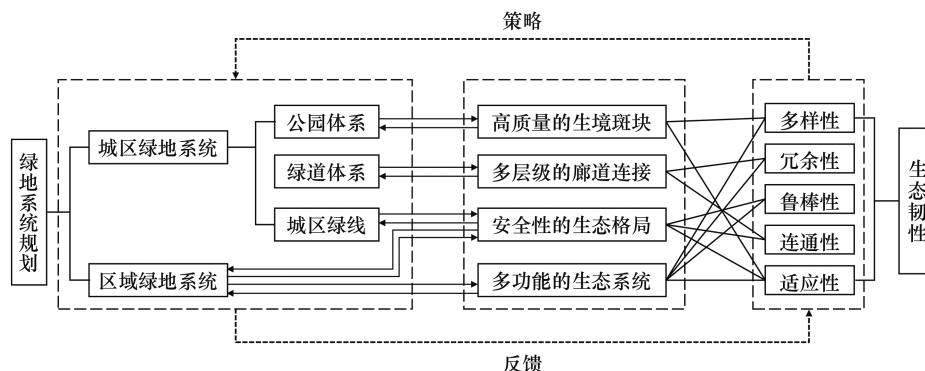


图2 绿地系统规划与生态韧性分析之间的“策略-反馈”互动示意图

Fig.2 Strategy-feedback interaction mechanism between Green Space Planning and ecological resilience analysis

护地体系规划等提供科学支撑。中观协调层面,科学、完善的绿色空间能够为城市提供应对风险侵袭的硬件支撑,以提升生态韧性为导向优化绿色空间的服务供给、功能配置以及设施分布有助于城市开发边界精明管控、城市安全与基础设施的科学布局,可与国土空间规划中防洪排涝、海绵城市、市政设施等专项规划相协同,构建更加安全、可持续的城市系统。微观实践层面,结合详细规划以及低影响开发、社区更新等内容,提升绿色空间品质与服务能力的同时增强其应对风险的能力,配合公众参与机制营建韧性社区。

4 总结与展望

本文对绿色空间的相关概念进行辨析,认为绿色空间应以生态空间为主且包含生产、生活空间中的绿色环境载体。在多学科交叉融合的背景下,绿色空间格局的研究从时空演变评价、驱动机制识别以及情景模拟优化三个部分展开。生态环境的恶化以及高质量城市发展的需求使生态韧性成为重要议题。绿色空间是生态韧性的重要载体,耦合生态韧性评价与绿色空间优化能够提升城市抗干扰能力,也能够从多个维度支撑现行绿地系统规划及国土空间规划,推动区域的可持续发展。

国内关于生态韧性的研究兴起于20世纪90年代,学者们对绿色空间生态韧性开展了众多有益的研究探索,形成了多元的研究方法与丰富的研究成果,但仍存在一定的局限。研究目标方面,应重视城镇空间发展与生态保护的平衡,耦合居民的生产生活需求以提升国土空间的整体质量。研究内容方面,现有研究较少关注绿色空间需求量与生态阈值的关系,且有关如何平衡生态阈值与生态韧性水平区间的研究较为缺乏。生态韧性的评价多关注生态空间与生态系统本身,缺乏对社会-生态系统整体的分析与评价。研究方法方面,现有研究多关注某尺度绿色空间的研究,未来可借鉴国外多种方法、工具、指标综合运用趋势,加强对多尺度综合性绿色空间生态韧性分析与优化的探索。未来关于绿色空间生态韧性的研究可关注以下几点。

(1) 耦合不同尺度绿色空间的分析方法,构建多层次生态韧性评价体系

不同尺度绿色空间在生态安全格局的优化及生态系统功能的提升过程中发挥着不同的作用,同时各尺度绿色空间生态效益的发挥也会受到其他尺度绿色空间状态及变化的影响。综合区域、城市、街区及社区多尺度绿色空间的分析方法,构建多层次、跨尺度的生态韧性评价体系,有利于生态系统结构稳定性与功能完整性的整体提升。此外,多层次的评价体系能够更好的提升各尺度绿色空间生态韧性,各个子系统生态韧性的累积、传递与协同,进而提升整个生态系统应对内外干扰的抵抗力、适应力及恢复力。

(2) 深化对社会-生态系统整体性的分析,加强社会-生态空间的交互影响研究

城市是一个复杂的社会-生态系统(SES),城市生态韧性取决于社会子系统与自然子系统之间的交互关系,是二者相互影响共同作用的结果。城市生态韧性的评估与分析不能脱离社会子系统单纯分析生态层面的能力与潜力,而应综合社会-生态系统各个子系统对于生态韧性的保护与胁迫作用,结合情景模拟预测子系统

间的相互影响,将未来城市生态韧性提升的潜力与面临的挑战纳入研究中。生态韧性导向下绿色空间的相关研究应注重多学科交叉与融合,耦合绿色空间时空演进分析与社会-生态空间生态韧性定性定量的研究,基于多维度的定量评估与模拟调整社会结构、优化蓝绿空间网络,实现城市发展与生态保护之间的平衡。

(3) 寻求兼顾开发与保护的区域生态韧性水平区间,增强对不同生态韧性绿色空间分区治理研究

现有研究多关注具有重要生态功能绿色空间的识别与保护,但绿色空间的生态韧性不是越高越好,而应当在生态阈值的限度内,兼顾区域发展与生态保护,在开发与保护中寻求适当的绿色空间生态韧性水平区间。未来的研究应当在厘清区域生态韧性水平与影响机制基础上,结合绿色空间在休闲游憩、文化教育等方面发挥的作用,针对不同生态韧性的绿色空间进行相应的治理与管控。通过绿色空间生态韧性评估、模拟与优化提升一系列研究,以空间规划为手段,把握生态韧性的时空分布特征及未来发展趋势,打造普惠优质的生态环境,实现城乡自然与社会空间的协调配合与共同发展。

参考文献(References):

- [1] Haase D, Nuissl H. Does urban sprawl drive changes in the water balance and policy The case of Leipzig (Germany) 1870—2003. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 80(1/2): 1-13.
- [2] Angeler D G, Allen C R. Quantifying resilience. *Journal of Applied Ecology*, 2016, 53(3): 617-624.
- [3] 王少剑,崔子恬,林靖杰,谢金燕,苏坤. 珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究. *地理学报*, 2021, 76(4): 973-991.
- [4] 赵海霞,王淑芬,孟菲,牛铭杰,骆新燎. 绿色空间格局变化及其驱动机理——以南京都市区为例. *生态学报*, 2020, 40(21): 7861-7872.
- [5] 李方正. 基于多源数据分析的北京市中心城绿色空间格局演变和优化研究[D]. 北京:北京林业大学, 2018.
- [6] 李锋,王如松. 城市绿色空间生态服务功能研究进展. *应用生态学报*, 2004, 15(3): 527-531.
- [7] 常青,李双成,李洪远,彭建,王仰麟. 城市绿色空间研究进展与展望. *应用生态学报*, 2007, 18(7): 1640-1646.
- [8] 邵明,李方正,李雄. 基于多源数据的成渝城市群绿色空间生态系统服务功能供需评价. *风景园林*, 2021, 28(1): 60-66.
- [9] Wu W B, Ma J, Meadows M E, Banzhaf E, Huang T Y, Liu Y F, Zhao B. Spatio-temporal changes in urban green space in 107 Chinese cities (1990-2019): The role of economic drivers and policy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 12(103): 102525.
- [10] Li K, Hou Y, Andersen P S, Xin R H, Rong Y J, Skov-Petersen H. An ecological perspective for understanding regional integration based on ecosystem service budgets, bundles, and flows: A case study of the Jinan metropolitan area in China. *Journal of Environmental Management*, 2022, 305: 114371.
- [11] 李畅. 环境流行病学视角下城市绿地空间的健康效应研究. *风景园林*, 2021, 28(8): 94-99.
- [12] 周美玲,冯秀丽,刘恺恺,张驰,谢立建. 绿色空间与经济发展典型要素时空匹配性研究——以浙江省为例. *中国土地科学*, 2021, 35(3): 107-114.
- [13] Zhao J J, Chen S B, Jiang B, Ren Y, Wang H, Vause J, Yu H D. Temporal trend of green space coverage in China and its relationship with urbanization over the last two decades. *Science of the Total Environment*, 2013, 442: 455-465.
- [14] 邹兵. 增量规划、存量规划与政策规划. *城市规划*, 2013, 37(2): 35-37, 55.
- [15] 戴菲,毕世波,陈明. 基于国家自然科学基金面上项目的城市绿色空间前沿研究分析:热点与方法. *风景园林*, 2021, 28(2): 10-15.
- [16] 杨振山,张慧,丁悦,孙艺芸. 城市绿色空间研究内容与展望. *地理科学进展*, 2015, 34(1): 18-29.
- [17] 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. *Landscape and Urban Planning*, 2013, 118: 112-119.
- [18] Ngom R, Gosselin P, Blais C. Reduction of disparities in access to green spaces: their geographic insertion and recreational functions matter. *Applied Geography*, 2016, 66: 35-51.
- [19] Turner T. Open space planning in London: From standards per 1000 to green strategy. *Town Planning Review*, 1992, 63(4): 365.
- [20] Lovell S T, Taylor J R. Supplying urban ecosystem services through multifunctional green infrastructure in the United States. *Landscape Ecology*, 2013, 28(8): 1447-1463.
- [21] 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. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, 41: 333-343.
- [22] 王鹏,陈亚,何友均,闫钰倩. 区域绿色空间用途管制理论分析与关键问题识别. *生态经济*, 2019, 35(9): 177-181, 221.
- [23] 李方正,解爽,李雄. 基于PLSR模型的北京市中心城绿色空间演变驱动机制研究(1992—2016年). *北京林业大学学报*, 2019, 41(4):

116-126.

- [24] 黄铎, 易芳蓉, 汪思哲, 韦慧杰, 王世福. 国土空间规划中蓝绿空间模式与指标体系研究. 城市规划, 2022, 46(1): 18-31.
- [25] 葛韵宇. 基于生态系统服务评估的北京市第二道绿化隔离地区绿色空间格局演变与优化研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [26] Schrammeijer E A, Malek Ž, Verburg P H. Mapping demand and supply of functional niches of urban green space. *Ecological Indicators*, 2022, 140: 109031.
- [27] 张悦文, 金云峰. 基于绿地空间优化的城市用地功能复合模式研究. 中国园林, 2016, 32(2): 98-102.
- [28] Fongar C, Randrup T B, Wiström B, Solfeld I. Public urban green space management in Norwegian municipalities: A managers' perspective on place-keeping. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, 44: 126438.
- [29] Taylor L, Hochuli D F. Defining greenspace: Multiple uses across multiple disciplines. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 158: 25-38.
- [30] 李莹莹, 黄成林, 张玉. 快速城市化背景下上海绿色空间景观格局梯度及其多样性时空动态特征分析. 生态环境学报, 2016, 25(7): 1115-1124.
- [31] 许浩, 金婷, 刘伟. 苏锡常都市圈蓝绿空间规模与格局演变特征. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2022, 46(1): 219-226.
- [32] Cui L, Wang J, Sun L, Lv C D. Construction and optimization of green space ecological networks in urban fringe areas: A case study with the urban fringe area of Tongzhou district in Beijing. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 276: 124266.
- [33] Baycan-Levent T, Nijkamp P. Planning and Management of Urban Green Spaces in Europe: Comparative Analysis. *Journal of Urban Planning and Development*, 2009, 135(1): 1-12.
- [34] 黄槟铭, 李方正, 李雄. 耦合空间规划体系的区域绿地规划思路. 规划师, 2020, 36(2): 5-11.
- [35] 骆畅, 李相逸, 李淙钰. 基于生态系统服务价值评估的山地城市绿色空间规划策略——以重庆市主城区为例. 西南大学学报: 自然科学版, 2021, 43(5): 195-204.
- [36] 李方正, 刘阳, 施瑶, 胡凯富, 郑曦. 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. 北京林业大学学报, 2019, 41(11): 125-136.
- [37] 陈燕红, 蔡莞臻, 仝川. 福州主城区绿色空间不同演化模式对地表温度扰动的影响. 环境科学研究, 2020, 33(4): 995-1004.
- [38] Yang J, Sun J, Ge Q S, Li X M. Assessing the impacts of urbanization-associated green space on urban land surface temperature: A case study of Dalian, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017, 22: 1-10.
- [39] 岳峰, 傅凡, 戴菲, 袁满, 曾辉. 基于遥感反演的绿色空间景观格局对气溶胶污染的影响. 中国园林, 2021, 37(9): 83-88.
- [40] 余欣璐, 高吉喜, 张彪. 基于城市绿地滞尘模型的上海市绿色空间滞留 PM_{2.5} 功能评估. 生态学报, 2020, 40(8): 81-90.
- [41] Noor N M, Asmawi M Z, Abdullah A. Sustainable Urban Regeneration: GIS and Hedonic Pricing Method in Determining the Value of Green Space in Housing Area. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2015, 170: 669-679.
- [42] 熊秀海, 代侦勇, 熊斌梅, 谢翠容. 绿色空间生态服务与地形因子的相关性分析. 测绘地理信息, 2017, 42(3): 94-97, 109.
- [43] Zhang B, Xie G D, Li N, Wang S. Effect of urban green space changes on the role of rainwater runoff reduction in Beijing, China. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 140: 8-16.
- [44] 罗杨菲, 杨眉. 洪涝适应性景观设计的原则与策略. 林业与生态科学, 2021, 36(2): 198-204.
- [45] 余洋, 王馨笛, 陆诗亮. 促进健康的城市景观: 绿色空间对体力活动的影响. 中国园林, 2019, 35(10): 67-71.
- [46] Reklaitiene R, Grazuleviciene R, Dedele A, Virviciute D, Vensloviene J, Tamosiunas A, Baceviciene M, Luksiene D, Sapranaviciute-Zabazlajeva L, Radisauskas R, Bernotiene G, Bobak M, Nieuwenhuijsen M J. The relationship of green space, depressive symptoms and perceived general health in urban population. *Scandinavian Journal of Public Health*, 2014, 42(7): 669-676.
- [47] Cheng P, Min M, Hu W Y, Zhang A L. A Framework for Fairness Evaluation and Improvement of Urban Green Space: A Case of Wuhan Metropolitan Area in China. *Forests*, 2021, 12(7): 890.
- [48] 梁东成, 陈小奎, 张培培. 城市绿地的经济效益分析与评价. 林业经济问题, 2012, 32(5): 458-460, 465.
- [49] Li Z H, Wang J, Kong X S, Zhang B E, Liu J J, Ding S, Du Y K. Effects of ecosystems preservation on economic growth in China's coastal region: Multilevel modelling and exploration. *Ecological Indicators*, 2021, 132: 108224.
- [50] Du M B, Zhang X L. Urban greening: A new paradox of economic or social sustainability? *Land Use Policy*, 2020, 92: 104487.
- [51] 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. 地理科学进展, 2020, 39(10): 1770-1782.
- [52] Sexton J O, Urban D L, Donohue M J, Song C H. Long-term land cover dynamics by multi-temporal classification across the Landsat-5 record. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 128: 246-258.
- [53] 陈康林, 龚建周, 陈晓越, 李天翔. 广州城市绿色空间与地表温度的格局关系研究. 生态环境学报, 2016, 25(5): 842-849.
- [54] Hayes M M, Miller S N, Murphy M A. High-resolution landcover classification using Random Forest. *Remote Sensing Letters*, 2014, 5(2): 112-121.
- [55] 陈品. 基于 RS 与 Fragstats 的霞浦县绿地信息提取与景观格局分析[D]. 福州: 福建农林大学, 2019.

- [56] 田德宇, 张耀南, 赵国辉, 韩立钦. 基于卷积神经网络的遥感沙漠绿地提取方法. 遥感技术与应用, 2018, 33(1): 151-157.
- [57] 赵红蕊, 刘欣桐, 王超军. 时空信息熵在延河流域生态可持续性分析中的应用. 生态学报, 2022, 42(9): 3749-3758.
- [58] 李空明, 李春林, 曹建军, 王昊, 刘森, 吕久俊, 郝真. 基于景观生态学的辽宁中部城市群绿色基础设施 20 年时空格局演变. 生态学报, 2021, 41(21): 8408-8420.
- [59] 于亚平, 尹海伟, 孔繁花, 王晶晶, 徐文彬. 基于 MSPA 的南京市绿色基础设施网络格局时空变化分析. 生态学杂志, 2016, 35(6): 1608-1616.
- [60] Wickham J D, Riitters K H, Wade T G, Vogt P. A national assessment of green infrastructure and change for the conterminous United States using morphological image processing. Landscape and Urban Planning, 2010, 94(3-4): 186-195.
- [61] 邵明, 董宇翔, 林辰松. 基于 GWR 模型的成渝城市群生态系统服务时空演变及驱动因素研究. 北京林业大学学报, 2020, 42(11): 118-129.
- [62] 王圳峰, 刘燕, 王欣珂, 林赛男, 刘兴诏. 福建省绿色空间时空演变及驱动因素分析. 广西师范大学学报(自然科学版), 40(4): 227-246.
- [63] 翟天林, 王静, 金志丰, 祁元. 长江经济带生态系统服务供需格局变化与关联性分析. 生态学报, 2019, 39(15): 5414-5424.
- [64] 耿甜伟, 陈海, 张行, 史琴琴, 刘迪. 基于 GWR 的陕西省生态系统服务价值时空演变特征及影响因素分析. 自然资源学报, 2020, 35(7): 1714-1727.
- [65] 易阿岚, 王钧. 上海市湿地景观格局时空演变与驱动机制的量化研究. 生态学报, 2021, 41(7): 2622-2631.
- [66] 马明德, 马学娟, 谢应忠, 马甜. 宁夏生态足迹影响因子的偏最小二乘回归分析. 生态学报, 2014, 34(3): 682-689.
- [67] 孙杨, 许承明, 夏锐. 研发资金投入渠道的差异对科技创新的影响分析——基于偏最小二乘法的实证研究. 金融研究, 2009(9): 165-174.
- [68] Tenerelli P, Demšar U, Luque S. Crowdsourcing indicators for cultural ecosystem services: A geographically weighted approach for mountain landscapes. Ecological Indicators, 2016, 64: 237-248.
- [69] Huang X, Huang X J, Liu M M, Wang B, Zhao Y H. Spatial-temporal dynamics and driving forces of land development intensity in the Western China from 2000 to 2015. Chinese Geographical Science, 2020, 30(1): 16-29.
- [70] 王海军, 张彬, 刘耀林, 刘艳芳, 徐姗, 邓羽, 赵雲泰, 陈宇琛, 洪松. 基于重心-GTWR 模型的京津冀城市群城镇扩展格局与驱动力多维解析. 地理学报, 2018, 73(6): 1076-1092.
- [71] Nor A N M, Corstanje R, Harris J A, Brewer T. Impact of rapid urban expansion on green space structure. Ecological Indicators, 2017, 81: 274-284.
- [72] 吴榛, 张凯云, 王浩. 城市扩张情景模拟下绿地生态网络构建与优化研究——以南京市部分区域为例. 中国园林, 2022, 38(4): 56-61.
- [73] 夏楚瑜, 董照樱子, 陈彬. 城市生态韧性时空变化及情景模拟研究——以杭州市为例. 生态学报, 2022, 42(1): 116-126.
- [74] 杨晓明, 蔡宇阳, 巫雨洋, 翁敏. 城市扩展模拟预测: 多种机器学习算法的比较. 测绘地理信息, 2021, 46(5): 98-101.
- [75] Li F Z, Wang R F, Lu S S, Shao M, Ding J Y, Sun Q X. Spatiotemporal Simulation of Green Space by Considering Socioeconomic Impacts Based on A SD-CA Model. Forests, 2021, 12(2): 202.
- [76] 幸瑞桑, 周启刚. 基于 Ann-CA-Markov 模型的生态空间预测模拟: 以重庆市万州区为例. 生态与农村环境学报, 2021, 37(6): 740-750.
- [77] Varga O G, Pontius R G Jr, Singh S K, Szabó S. Intensity Analysis and the Figure of Merit's components for assessment of a Cellular Automata-Markov simulation model. Ecological Indicators, 2019, 101: 933-942.
- [78] Liu X P, Liang X, Li X, Xu X C, Ou J P, Chen Y M, Li S Y, Wang S J, Pei F S. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. Landscape and Urban Planning, 2017, 168: 94-116.
- [79] Jiao M Y, Hu M M, Xia B C. Spatiotemporal dynamic simulation of land-use and landscape-pattern in the Pearl River Delta, China. Sustainable Cities and Society, 2019, 49: 101581.
- [80] Gantumur B, Wu F L, Vandansambuu B, Tsegmid B, Dalaibaatar E, Zhao Y. Spatiotemporal dynamics of urban expansion and its simulation using CA-ANN model in Ulaanbaatar, Mongolia. Geocarto International, 2022, 37(2): 494-509.
- [81] Shen S. Dynamic Simulation of Urban Green Space Evolution Based on CA-Markov Model-A Case Study of Hexi New Town of Nanjing City, China. Applied Ecology and Environmental Research, 2019, 17(4): 8569-8581.
- [82] 张晓荣, 李爱农, 南希, 雷光斌, 王昌博. 基于 FLUS 模型和 SD 模型耦合的中巴经济走廊土地利用变化多情景模拟. 地球信息科学学报, 2020, 22(12): 2393-2409.
- [83] Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES). The methodological assessment report on scenarios and models of biodiversity and ecosystem services. Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn, Germany, 2016.
- [84] O'Neill B C, Kriegler E, Ebi K L, Kemp-Benedict E, Riahi K, Rothman D S, van Ruijven B J, van Vuuren D P, Birkmann J, Kok K, Levy M,

- Solecki W. The Roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, 2017, 42: 169-180.
- [85] 邵壮, 陈然, 赵晶, 夏楚瑜, 何颖婷, 唐丰芸. 基于 FLUS 与 InVEST 模型的北京市生态系统碳储量时空演变与预测. *生态学报*, 2022, 42 (23). DOI:10.5846/stxb202201100094
- [86] Klein R J T, Nicholls R J, Thomalla F. Resilience to natural hazards: how useful is this concept? *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*, 2003, 5(1): 35-45.
- [87] Holling C S. Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4: 1-23.
- [88] Holling C S. *Engineering Resilience versus Ecological Resilience*. Washington DC: National Academies Press, 1996.
- [89] Baho D L, Allen C R, Garmestani A S, Fried-Petersen H B, Renes S E, Gunderson L H, Angeler D G. A quantitative framework for assessing ecological resilience. *Ecology and Society: a Journal of Integrative Science for Resilience and Sustainability*, 2017, 22(3): 1-17.
- [90] 余俏, 杜梦娇, 李昊宸, 汤西子, 李晓燕. 通向城乡韧性的蓝绿空间整体规划研究: 概念框架与实现路径. *Journal of Resources and Ecology*, 2022, 13(3): 347-359.
- [91] Dakos V, Kéfi S. Ecological resilience: what to measure and how. *Environmental Research Letters*, 2022
- [92] Pardini R, Bueno A, Gardner T A, Prado P I, Metzger J P. Beyond the Fragmentation Threshold Hypothesis: Regime Shifts in Biodiversity Across Fragmented Landscapes. *PLOS ONE*, 2010, 5(10): e13666.
- [93] Nail S. Memory and resilience: A two-pronged approach to natural spaces in Colombia's transition to a peaceful society. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 31: 48-55.
- [94] Baskett M L, Fabina N S, Gross K. Response diversity can increase ecological resilience to disturbance in coral reefs. *American Naturalist*, 2014, 184(2): E16-E31.
- [95] Craven D, Filotas E, Angers V A, Messier C. Evaluating resilience of tree communities in fragmented landscapes: linking functional response diversity with landscape connectivity. *Diversity and Distributions*, 2016, 22(5): 505-518.
- [96] Afriyane D, Julian M M, Riqqi A, Akbar R, Suroso D S, Kustiwan I. Re-framing urban green spaces planning for flood protection through socio-ecological resilience in Bandung City, Indonesia. *Cities*, 2020, 101: 102710.
- [97] Beilin R, Reichelt N T, King B J, Long A, Cam S. Transition Landscapes and Social Networks: Examining On-Ground Community Resilience and its Implications for Policy Settings in Multiscalar Systems. *Ecology and Society*, 2013, 18(2): art30.
- [98] Lyu X, Wang Y N, Niu S D, Peng W L. Spatio-Temporal Pattern and Influence Mechanism of Cultivated Land System Resilience: Case from China. *Land*, 2021, 11(1): 11.
- [99] Cao Q W, Zhang X W, Lei D M, Guo L Y, Sun X H, Kong F E, Wu J S. Multi-scenario simulation of landscape ecological risk probability to facilitate different decision-making preferences. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 227(AUG.1): 325-335.
- [100] 王红, 刘建德, 李杰. 利用弹性理论进行建筑生态环境空间预测分析——以贵州省黔东南侗族村镇建筑为例. *城市规划*, 2005, 29 (12): 93-96.
- [101] 顾康康, 程帆, 杨倩倩. 基于 GISP 模型的城市绿色基础设施多功能性评估. *生态学报*, 2018, 38(19): 7113-7119.
- [102] 李荷. 韧性营建: 高密度建成环境内生态空间优化研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [103] 周晓芳. 社会-生态系统恢复力的测量方法综述. *生态学报*, 2017, 37(12): 4278-4288.
- [104] Sherrieb K, Norris F H, Galea S. Measuring capacities for community resilience. *Social Indicators Research*, 2010, 99(2): 227-247.
- [105] Bennett E M, Cumming G S, Peterson G D. A systems model approach to determining resilience surrogates for case studies. *Ecosystems*, 2005, 8 (8): 945-957.
- [106] Cumming G S, Barnes G, Perz S, Schmink M, Sieving K E, Southworth J, Binford M, Holt R D, Stickler C, Holt T. An Exploratory Framework for the Empirical Measurement of Resilience. *Ecosystems*, 2005, 8(8): 975-987.
- [107] 毛鹏, 林爱文, 杨倩, 朱洪洁. 基于状态空间法的长江中游城市群区域生态承载力评价. *测绘与空间地理信息*, 2017, 40(3): 37-41.
- [108] Shi Y J, Zhai G F, Xu L H, Zhou S T, Lu Y W, Liu H B, Huang W. Assessment methods of urban system resilience: From the perspective of complex adaptive system theory. *Cities*, 2021, 112: 103141.
- [109] 杨超, 陈万旭, 冉端, 林玲. 中国县域生态系统弹性时空演变特征分析. *水土保持研究*, 2020, 27(4): 279-285.
- [110] Huang L Y, Wang J, Cheng H G. Spatiotemporal changes in ecological network resilience in the Shandong Peninsula urban agglomeration. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 339: 130681.
- [111] 陶洁怡, 董平, 陆玉麒. 长三角地区生态韧性时空变化及影响因素分析. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(9): 1975-1987.
- [112] Wang S J, Cui Z T, Lin J J, Xie J Y, Su K. The coupling relationship between urbanization and ecological resilience in the Pearl River Delta. *Journal of Geographical Sciences*, 2022, 32(1): 44-64.
- [113] 张城, 李晶, 周自翔. 基于水供给服务空间流动模型的渭河流域水资源安全格局. *地理科学*, 2021, 41(2): 350-359.

- [114] Nemec K T, Chan J, Hoffman C, Spanbauer T L, Hamm J A, Allen C R, Hefley T, Pan D, Shrestha P. Assessing resilience in stressed watersheds. *Ecology and Society*, 2014, 19: art34.
- [115] 董安涛, 史正涛, 苏旺德, 杨帆. 南汀河流域生态恢复潜力评价. *生态经济*, 2015, 31(10): 116-120.
- [116] 王甫园, 王开泳, 陈田, 李萍. 城市生态空间研究进展与展望. *地理科学进展*, 2017, 36(2): 207-218.
- [117] 章瑞, 王凯平, 张云路, 李雄. 基于空间演变多元分析的市域生态空间优化研究——以宁波市为例. *生态学报*, 2022, 42(1): 127-137.
- [118] 魏家星, 张昱镇, 连紫璇, 殷敏, 欧维新. 基于生态供需空间的区域生态安全格局构建研究——以苏南城市群为例. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(2): 387-397.
- [119] Sun X, Crittenden J C, Li F, Lu Z M, Dou X L. Urban expansion simulation and the spatio-temporal changes of ecosystem services, a case study in Atlanta Metropolitan area, USA. *Science of the Total Environment*, 2018, 622-623: 974-987.
- [120] 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. *生态学报*, 2007, 27(9): 3701-3710.
- [121] 王博娅, 刘志成. 城市更新背景下北京市中心城区生态网络的优化策略. *城市发展研究*, 2022, 29(1): 113-120.
- [122] 赵丹, 李锋, 王如松. 基于生态绿当量的城市土地利用结构优化——以宁国市为例. *生态学报*, 2011, 31(20): 6242-6250.
- [123] 欧维新, 赵丽宁, 李冉. 协调生态环境压力的区域生态用地需求模拟——以江苏省为例. *水土保持研究*, 2014, 21(4): 274-278.
- [124] 汪方心怡, 王敏. 多重生态系统服务需求下滨水绿道供给优化与精明发展. *中国城市林业*, 2022, 20(2): 51-56, 124.
- [125] Lee J G, Kweon B S, Ellis C D, Lee S W. Assessing the Social Value of Ecosystem Services for Resilient Riparian Greenway Planning and Management in an Urban Community. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(9): 3261.
- [126] Mukherjee M, Takara K. Urban green space as a countermeasure to increasing urban risk and the UGS-3CC resilience framework. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2018, 28: 854-861.
- [127] Jeong D, Kim M, Song K, Lee J G. Planning a Green Infrastructure Network to Integrate Potential Evacuation Routes and the Urban Green Space in a Coastal City: The Case Study of Haeundae District, Busan, South Korea. *Science of The Total Environment*, 2021, 761: 143179.
- [128] Pandolfi G, Pettinari J. NATURE-BASED SOLUTIONS FOR FLOOD MANAGEMENT: A STUDY CONDUCTED IN LABARO-PRIMA PORTA DISTRICT, ROME, ITALY. *Environmental Engineering and Management Journal*, 2020, 19(10): 1835-1846.
- [129] 达周才让, 牛萌, 何俊超, 白伟岚, 邹舟. 基于区域雨洪调控的中央公园海绵系统设计方法研究——以沣西新城大西安中央公园为例. *中国园林*, 2021, 37(5): 80-85.
- [130] 陈泓宇, 李雄. 基于 MSPA-InVEST 模型的北京中心城区绿色空间生境网络优化. *风景园林*, 2021, 28(2): 16-21.
- [131] Wang J M, Liu H, Chen C D, Zhang S, Guo F, Li Y Y. The resilience research of the plant and soil optimization design base on the habitat-site design in semiarid green space. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, 191(4): 225.
- [132] Ahern J. Urban landscape sustainability and resilience: the promise and challenges of integrating ecology with urban planning and design. *Landscape Ecology*, 2013, 28(6): 1203-1212.
- [133] 邵明. 多目标导向下成渝城市群绿色空间时空演变评价及优化研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2021.
- [134] Arthur N, Hack J. A multiple scale, function, and type approach to determine and improve Green Infrastructure of urban watersheds. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2022
- [135] Yamu C, Frankhauser P. Spatial accessibility to amenities, natural areas and urban green spaces: using a multiscale, multifractal simulation model for managing urban sprawl. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2015: b130171p.
- [136] 胡庭浩, 常江, 拉尔夫-乌韦·思博. 德国绿色基础设施规划的背景、架构与实践. *国际城市规划*, 2021, 36(1): 109-119.