

DOI: 10.20103/j.stxb.202310222296

刘珍环, 魏莱, 周义. 面向城市生物多样性提升的可持续景观格局构建机理与途径. 生态学报, 2024, 44(14): 5905-5913.

Liu Z H, Wei L, Zhou Y. Constructing sustainable landscape patterns for enhancing urban biodiversity. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(14): 5905-5913.

面向城市生物多样性提升的可持续景观格局构建机理与途径

刘珍环*, 魏 莱, 周 义

中山大学地理科学与规划学院, 广东省粤北岩溶区碳水耦合野外科学观测研究站, 广州 510006

摘要: 城市生物多样性是全球生物多样性的重要组成部分, 城市是地理学、生态学及风景园林学等学科领域关注的核心地域。城市生态系统退化直接或间接地干扰了城市生境并造成了区域生物多样性丧失。为实现可持续城市和社区(SDG11)和陆地生物(SDG15)两项可持续发展目标, 提升城市生物多样性的途径是当前城市生物多样性研究热点。可持续景观格局调控与构建是提升生物多样性的可能途径, 城市生境与生物多样性的关系是可持续景观格局构建的重要内涵, 科学地认知两者的相互作用关系是景观格局调控的根本。研究通过梳理生物多样性与景观生态学的交叉研究, 提出了可持续城市景观格局研究的转变趋向: 从生物多样性保护的被动适应式的生态安全格局构建转向主动调控提升生物多样性的可持续城市景观格局构建。加强多尺度的级联, 在斑块尺度上的城市生境恢复和营建, 景观尺度上构建面向城市生物多样性提升的可持续景观格局识别与连通优化, 区域尺度上开展生物多样性保护规划。研究为城市生物多样性的保护与提升提供科学途径, 进而促进城市景观生态学的理论与实践发展。

关键词: 生物多样性; 城市生境; 可持续景观格局; 城市

Constructing sustainable landscape patterns for enhancing urban biodiversity

LIU Zhenhuan*, WEI Lai, ZHOU Yi

Carbon-Water Observation and Research Station in Karst Regions of Northern Guangdong, School of Geography and Planning, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510006, China

Abstract: Urban biodiversity is an important component of global biodiversity. Cities are the core areas of concern in multidiscipline such as geography, ecology, and landscape architecture. The degradation of urban ecosystems directly or indirectly interferes with urban habitats and causes regional biodiversity loss. To achieve the two sustainable development goals of sustainable cities and communities (SDG11) and Life on Land (SDG15), enhancing urban biodiversity is currently a hot topic in the field of urban biodiversity research. The regulation and construction of sustainable landscape pattern is a possible way to enhance biodiversity, and the interaction between urban habitat and biodiversity is a core scientific issue of sustainable landscape pattern construction. Understanding the interaction between the two is the foundation for landscape pattern regulation. Our research proposes a shift in the study of sustainable urban landscape patterns: from the construction of passively adaptive ecological security pattern of biodiversity protection to the construction of sustainable urban landscape patterns which provides active regulation of biodiversity enhancement. It also points out that the current biodiversity enhancement oriented sustainable urban landscape pattern faces a lot of difficulties and problems, including the lack of widely recognized modeling methods, the controversy over the choice of landscape element indicators, the lack of universal conclusions on the threshold value of landscape elements, and how to use the threshold value to guide the spatial planning

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42371109)

收稿日期: 2023-10-22; **网络出版日期:** 2024-05-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuzhh39@mail.sysu.edu.cn

for diversity enhancement are yet to be explored. By restoring and constructing urban habitats at the patch scale, and constructing sustainable landscape pattern and connectivity for enhancing urban biodiversity at the landscape scale, and urban biodiversity planning at the regional scale, a sustainable landscape pattern approach is provided for the protection and enhancement of urban biodiversity. It will provide a scientific approach to the conservation and maintenance of urban biodiversity, enable biodiversity conservation to succeed in the changing urban environment, and promote the theoretical and practical development of urban landscape ecology.

Key Words: biodiversity; urban habitats; sustainable landscape pattern; urban areas

城市是人与自然联系的重要纽带,也是生物多样性保护的热点区域^[1]。城市扩张加速了生态系统退化,对生境的干扰和占用造成了区域生物多样性丧失^[2-3],城市空间环境的重塑决定了城市生物多样性分布格局和物种定居或入侵的机制。城市生态学研究城市环境中生物及其与环境的相互关系,以探寻提高城市人居环境质量和促进城市可持续发展的生态学途径^[4-5]。城市化正深刻地影响着城市及区域尺度的生态系统格局和功能^[5],掌握物种多样性分布与生境的动态变化规律,才能为管控城市生态系统提供科学的可持续景观途径^[6-7]。随着全球城市化的发展,城市生态学的研究范式转变^[8],新的城市生态学现象和过程尚未完全科学认知^[9],亟待探索可持续地维持和改善城市生态系统,以推进城市生物多样性从认知到应用的景观途径^[1,10]。城市生物多样性研究是实现《2030 年可持续发展议程》中可持续城市和社区(SDG11)和陆地生物(SDG15)两项目标相互作用关系的关键^[11]。

景观生态学为生物多样性保护发展了生态安全格局等方法和技术景观途径^[11],但不管是就地保护还是迁移保护,以保护为目的生物多样性研究和管理都是生物多样性丧失或濒危情形下的应急途径^[12-13],是一种被动式的适应过程^[14]。我国经历了世界上最快速的城市化过程,这一过程对生物多样性的影响与生物适应已成为中国景观生态学中一个快速拓展的研究领域^[8,11]。目前,关于城市景观和生物多样性的研究主要集中在城市生态环境评估方面,而监测生物多样性动态及其对城市化过程的响应方面的研究较少^[15-16],亟待开展城市生物多样性变化规律研究,促进认识物种多样性与生境景观的关联关系认知;进而建立可持续景观格局方法,主动调控和营建生境提升生物多样性。

1 城市生物多样性的景观影响机理

近年来,城市生态进化学受到关注,正成为城市生态学研究核心,城市生境修复与保护需考虑进化过程^[17]。城市生态生物多样性研究关注城市栖息地与生物多样性的相互作用,包括城市栖息地变化、生物遗传性状变化以及生态进化互馈(图 1)。城市化对生物多样性存在显著影响,研究城市生物多样性与生境关系需要将进化视角集成到城市生态管理中,以便让生物多样性保护在变化的城市环境中获得成功^[15]。Alberti^[18]认为城市化影响生态进化动态的机制主要包含了栖息地改变和生物相互作用:城市化通过改变栖息地和生物相互作用调节生态进化反馈;生态进化对城市栖息地的反馈主要包括生态系统功能和生态进化反馈机制;城市不仅仅是通过减少本地物种的数量和种类来改变生物多样性,许多生物包括节肢动物、鸟类、鱼类、哺乳动物和植物,正在通过改变其生理、形态和行为来适应新的环境;人是选择者,决定哪些物种可以生活在城市中,并导致生物经历快速的进化变化^[19](图 1)。

1.1 栖息地改造影响生物多样性分布

社会经济和技术进步极大地影响了城市景观变化的规模和速度,导致生态变化快速超越城市边界。栖息地斑块及其物种群落通常被建筑环境基质隔离,土地覆被变化和本土栖息地丧失是微观进化的主要驱动因素。城市化改变了物种分布和相互作用的方式,城市发展为物种竞争和捕食创造了新的机遇和挑战^[20]。在城市环境中,栖息地结构(森林覆盖和连通性变化)和过程(生物地球化学和养分循环)变化以及生物相互作

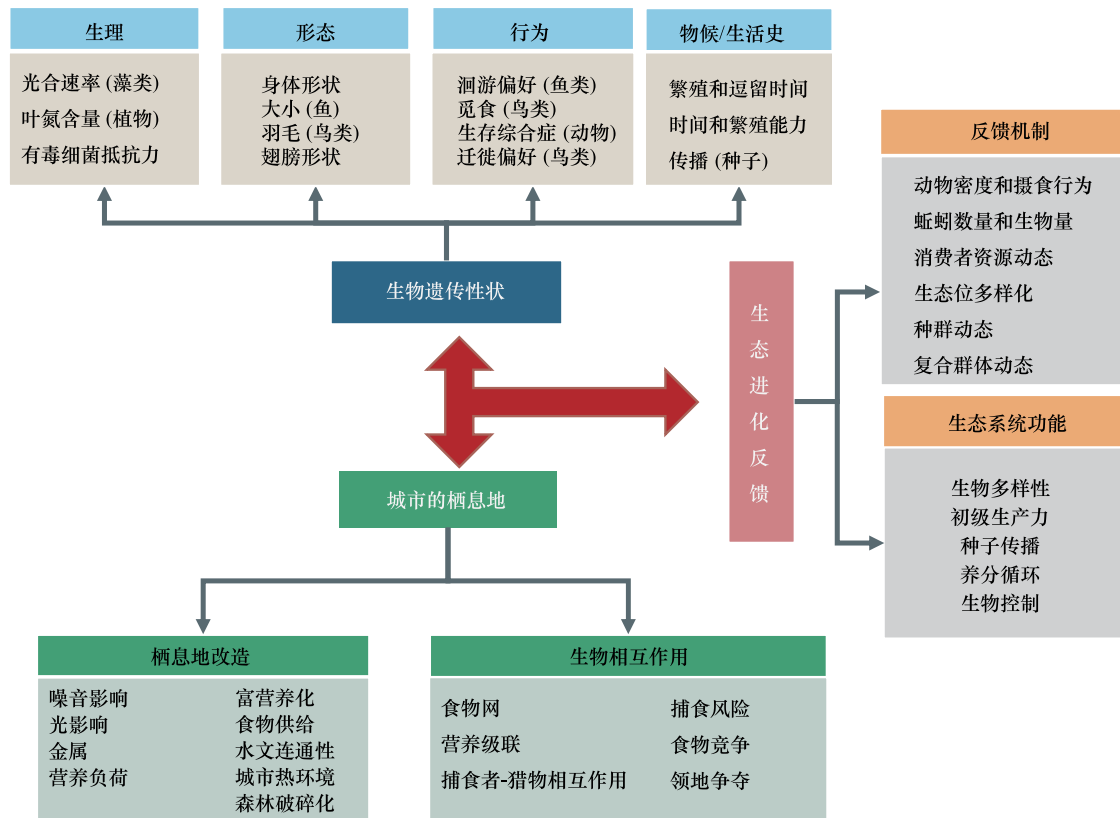


图1 城市生物、栖息地与生态进化互馈关系

Fig.1 Ecological evolutionary feedbacks between urban habitats and biogenetic traits

用(即捕食)变化的综合影响引起了栖息地改变^[21]。将城市化确定为干预生态和进化动态之间相互作用的变量,人类通过引入栖息地、生物相互作用、异质性、新干扰和社会相互作用等变化,以微妙的方式调节进化与生态之间的相互作用和反馈。自然斑块破碎化是人类活动对植被多样性、结构和分布以及自然斑块之间资源和生物移动的最显著影响之一^[22]。

城市物种多样性很大程度上受栖息地质量和资源量的影响。栖息地异质性允许更大的生态位分化,从而容纳更多的物种。城市化通过改变景观异质性影响栖息地质量和资源可用性。例如,与城市化相关的微气候变化产生的缓冲效应,城市热岛延长温带城市的生长季,进而影响生态进化^[19]。尽管存在大量具有不同环境条件的小斑块,与城市土地利用相关的栖息地变化充当了城市物种组成的过滤器,损失本地物种,导致生态结构和功能的同质化。

人类还通过引入新的干扰和改变栖息地异质性来调节生态进化相互作用。这些机制因城市梯度而异。城市化改变了现有的干扰机制(火灾、洪水),创造了新的干扰(新的或破坏的扩散途径、引入物种)。生态系统扰动影响资源可用性(即水和养分)、生态系统生产力和物种多样性。城市环境中人为干扰使城市栖息地维持在早期演替阶段,城市栖息地的斑块分布,加上不同程度的人为干扰,导致栖息地斑块之间出现许多演替途径。干扰可以通过两种方式调节生物多样性和生态系统功能之间的关系,可以增加多样性产生独特性,并可以抑制生态过程由单一分类单元控制的可能性。

1.2 生态进化反馈影响城市生态系统

城市生态系统的复杂特质是生态进化动态的不稳定和创新的根源,城市生态进化揭示了人类活动引起的生物变化,进而影响生物多样性和生态系统服务。物种的生态系统功能是理解城市化、生物多样性和生态系统稳定性之间关系的关键。人类通过城市化调节生态进化反馈,快速的进化影响生态系统的功能和稳定性。

城市生态系统演变通过环境、人口和群落动态影响生态系统过程,从而直接或间接影响生态系统功能。城市化对物种相互作用的特征(例如觅食、防御)施加选择性压力,控制生态系统功能的群落动态变化。城市化通过气候、水文、地貌、生物地球化学过程和生物相互作用的直接和微妙的变化影响初级生产力、养分循环、水文功能和生物多样性。城市发展与影响生态系统功能的遗传性状密切关联,人类引起的遗传性状变化影响了群落和生态系统中发挥重要功能作用的物种的生态进化。

2 城市生物多样性的景观实验与建模

城市自然实验将生态学实验建构在城市景观中,设计不同的人工梯度实验、自然梯度实验和城市建设实验,模拟和揭示城市生态与环境之间的因果关系,越来越受到人们的关注^[6]。城市是生物的典型栖息场所之一,人类是城市的主导者,而动植物是城市的利用者。城市是研究人类干扰下的生物多样性保护的天然实验场^[19]。相对于自然景观,改造后的景观更容易开展重复和半控制实验^[23],中国已经历了大规模的城市化过程,存在多种多样发展阶段的的城市景观模式^[24],解析城市生境与生物多样性的相互作用是指导城市生物多样性保护和管理实践的核心科学问题。为此,本研究从景观实验设计、生物多样性分布模式和城市生境-生物多样性的空间测度,简要介绍两者的相互作用。

2.1 城市景观梯度实验设计

沿城市化梯度的生物多样性受到栖息地变化和生物相互作用的影响,因此城乡梯度是设计城市生境景观实验的理想选择^[25]。城市中心区的林地已经破碎或被消灭,城乡交错带的森林转变和原生栖息地丧失的速度最快,带来的生物多样性变化也最为显著(图2)。城市化过程对自然生境的间接影响主要表现为城市生物多样性的损失,间接影响了全球近60%的濒危物种^[26]。在城市核心地区,本地物种持续减少,灭绝数量增加;与此同时,早期演替和共生物种的殖民化在城乡交错区达到顶峰,然后在城市核心区下降。随着景观城市化,新的物种竞争模式可能出现,人类活动可能会在郊区助长寄生物种,例如放置鸟巢盒。



图2 面向生物多样性提升的城市景观实验场:以鸟类为例

Fig.2 Urban landscape laboratory for bird biodiversity enhancement

城市景观实验与监测是研究城市生境与生物多样性的关系的重要手段。城乡梯度是测度生物多样性响应的一个典型建模方式,但物种间差异显著,鸟类和植物等都有不同的分布模式。例如比较城市-郊区、郊区-农村和郊区-自然梯度变化上的鸟类多样性变化可以发现,随着城市化进程的加快,物种丰富度下降显著变强^[27](图3)。城市景观要素对生物多样性水平的影响研究关注单个城市的因素分析^[28],多层次的城市整体分析仍然较为缺乏^[29-31],城市景观实验中生物多样性与生境关联机制的普适性尚未得到充分认知。

2.2 生物多样性分布模式

城市景观格局是新兴的、耦合人与自然作用的结果,集中体现了人类决策与生态过程之间相互作用和反馈机制的复杂性^[4]。城市发展通过用简化的、人类主导的系统取代原生栖息地直接影响生态过程,并通过格

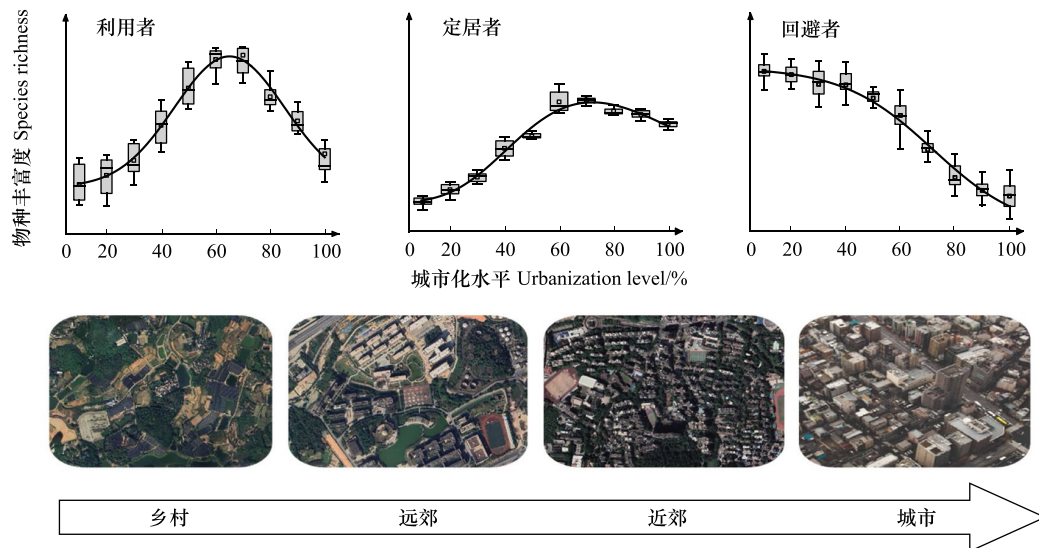


图3 城市生物多样性分布的城乡梯度模式

Fig.3 Urban-rural gradient patterns in urban biodiversity distribution

局改变间接地对局部和全球生态系统中相互关联的生物物理属性产生影响^[17]。城市化改变了地表、微气候、生境连通性、生态网络、物种多样性和物种组成^[32-33]。小而分散的生境是城市最为常见的景观格局,城市生境破碎化过程具有多阶段特征^[34],城市生物多样性包括物种丰富度、均匀度、数量分布、出现频率、分布范围大小、脆弱性、功能性状与系统发育谱系的多样性^[35-37]。两者随城市化过程而变化的规律可以简要概括如下^[38-39]:在城市化初期,以城市扩张为主的城市化过程直接导致了栖息地的破碎化和丧失,对生物多样性的影响最显著;而到了城市化后期,中心城区新建的小型生境斑块则有利于恢复局部地区的生物多样性^[40](图3)。

2.3 城市生境-生物多样性关系测度

物种与生境的相互作用是城市生物多样性的研究核心,预测城市生物多样性空间变化需在与研究和规划相关的尺度上建立准确的空间生物多样性模型^[41]。常用的生物多样性建模方式包含三种类型:(1)从物种观测点位记录数据进行建模或外推,例如结合单一物种分布模型预测一个地区物种丰富度的空间格局^[42-43],或者结合当地物种频率曲线组合分类群来估计丰富度^[35],这是保护规划中常采用的生物多样性建模方式,缺点是没有关联生境的影响,难以开展预测^[44]。(2)基于局地尺度的高分辨率生物多样性样本数据,与自然环境数据结合,如土地覆被类型、气候和其他环境数据^[45],确定栖息地适宜性及其出现率,预测物种的存在/缺失,该类模型方法信息丰富,缺点是生境异质性限制了模型的普适性^[46]。(3)采用栖息地质量作为生物多样性的替代指标或生物多样性潜力的衡量标准。生态系统服务评价常用这类替代模型,如 InVEST 模型的栖息地质量模型^[26],缺点是无法度量物种多样性的变化状况及响应特征。事实上,还需要更多的实验测度方式,以便更好地理解城市生境变化过程与生物多样性的空间相互作用。

3 提升城市生物多样性的可持续景观格局构建

近年来,可持续景观格局理念在国内外景观生态学界兴起^[47]。可持续景观格局被定义为景观要素的组成和配置的某种组合,使社会-生态过程能够可持续地提供稳定的生态系统服务,促进特定地区的人类福祉^[48]。可持续景观格局理论认为评估目标景观要素、识别关键空间区域和模拟未来发展情景,能有效支持空间规划以实现景观可持续性^[48-49]。景观异质性蕴含了多种跨尺度的生物多样性机制,生物多样性与景观生态学的交叉研究越来越受到学界关注^[11,50]。

尽管可持续景观格局构建在城市增长边界划定、城市生态网络、绿色基础设施优化和生态安全格局构建等方面的研究支撑景观规划,但迄今尚未有较有效的提升方法将生物多样性目标融入到城市空间规划中,进而推动生物多样性的提升^[51]。本研究认为,假设城市地区存在某种有利于生物多样性维持又保持了较高城市化水平的景观模式,则有可能作为理想的生物多样性保护模式——“最优景观格局”;以此为研究对象,通过测度物种多样性变化及其景观响应规律,获取生境景观要素阈值,建立城市景观格局优化调控目标,则有望构建以提升城市生物多样性为目标的可持续景观生态建设途径^[52](图4)。目前,可持续城市生境格局的研究还需在城市生境评估、绿色基础设施规划、三维生境景观营建与设计、城市生态系统韧性提升与风险防范、SDG11 与 SDG15 的协同实现路径等方面开展深入系统的工作^[53–54]。

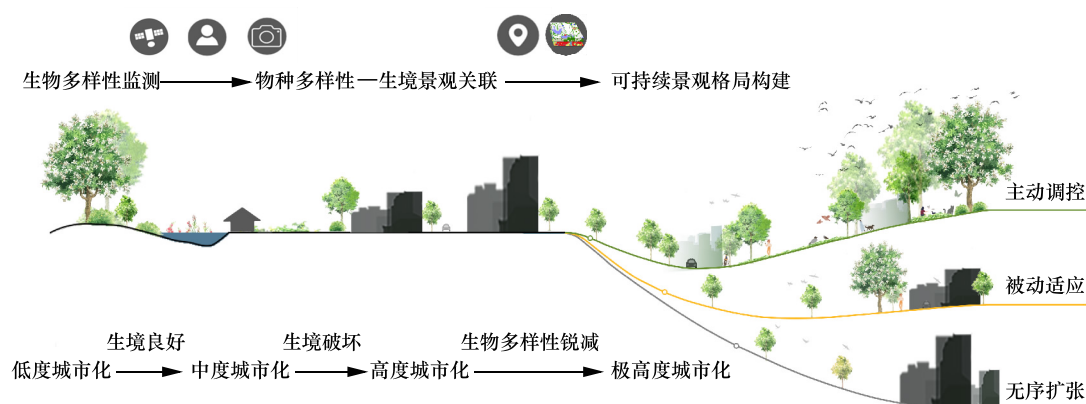


图4 提升城市生物多样性的可持续景观格局构建

Fig.4 Enhanced urban biodiversity based on sustainable landscape pattern construction

3.1 多尺度主动调控最优景观格局应对生物多样性丧失

评估城市景观要素是获取生境格局的首要步骤。度量城市化的强度、形态、异质性和景观连通性^[17],以空间方式测度城市化对生物多样性的影响。连通性是生物多样性保护的关键,增加城市绿地是提高生物多样性的有效措施^[55],在城市化初期,城市化强度对生物多样性产生深刻的负面影响时存在阈值,认为城市规划应侧重于保护水体和森林覆盖,以增加生物多样性,使城市化强度尽可能地维持在负面影响阈值之下^[56–57]。城市生境处于城市景观基质的包围之中,生境质量受到人类活动的干扰频率高,强度大,现有的生境质量评价方法难以完全度量城市生境的优劣,需要改进生境评价方法,以适应性管理城市生境。加强城市中景观在不同尺度等级的级联分析,在斑块尺度上的城市生境恢复和营建,景观尺度上识别可持续景观格局与连通优化,区域尺度上开展生物多样性保护规划。

3.2 将生物多样性-生境模型嵌入可持续景观格局构建

生物多样性空间建模需要深入理解如何响应景观格局,以及哪些结构和组成部分对生物多样性响应最有影响^[58]。生境景观要素是影响城市物种栖息、觅食、移动等行为的重要因素^[41]。生境破碎化^[59]、城市野化^[60–61]、景观连通性^[62]都是物种分布模型建模参数化所关注的景观要素^[42]。生物多样性是城市发展的自然本底以及重要的公共资源^[63]。城市生物多样性提供了水土保持、净化空气、缓解城市热岛效应等一系列的生态系统服务,生物多样性与提供稳定的生态系统服务密切关联,是可持续景观格局构建的重要目标。由于城市生态系统的高度异质性、非线性的人与自然协同进化等特征,直接量化城市化的生物多样性影响非常困难,很多学者通过发展系统识别替代指标的方法进行间接评估和优化^[4]。城市的物种、栖息地以及两者的空间格局与过程的耦合是很好的切入点^[64–66]。

可持续生境景观格局构建是实现 SDG11 与 SDG15 在城市地域协同的重要途径。城市的可持续景观格局本质是综合一系列生物物理格局和社会-生态过程互馈的最优景观要素组合模式^[48]。寻找保护有效的最优

景观格局是区域生物多样性规划的核心任务^[67-68],而可持续的生境景观格局是最优景观格局的核心^[47]。城市的生境景观多样性和异质性在支持生物多样性方面发挥着重要作用^[56, 69]。

可持续景观格局在景观生态网络^[70]、生态安全格局^[71]和绿色基础设施^[72]等模式构建方面取得了一些进展。然而,面向生物多样性提升的可持续景观格局构建的研究还存在以下难点和问题:格局构建所需的物种多样性-生境关系的建模方法仍然较薄弱,还没有得到广泛认可的空间建模方法;选取什么景观要素指标和数据刻画物种多样性-生境关系也存在争议,对其影响因素和驱动机制等研究仍稍显薄弱;现有的物种-生境关系研究仍停留在城市案例和全球案例荟萃分析层面,生境景观要素识别和阈值判定还有待获得普适性结论;如何利用物种多样性-生境关系的阈值指导空间规划实践以提升城市生物多样性还需进一步探索。在城市化背景下,如何应用景观生态学原理就生物多样性与生境景观格局的关系开展解构,从生物多样性的保护向提升转换的景观管理途径是当前城市生态学中生物多样性保护与提升的主要应用和发展趋势。

参考文献 (References):

- [1] Alberti M, Wang T Z. Detecting patterns of vertebrate biodiversity across the multidimensional urban landscape. *Ecology Letters*, 2022, 25(4): 1027-1045.
- [2] Aronson M F J, Lepczyk C A, Evans K L, Goddard M A, Lerman S B, MacIvor J S, Nilon C H, Vargo T. Biodiversity in the city: key challenges for urban green space management. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2017, 15(4): 189-196.
- [3] Alvey A A. Promoting and preserving biodiversity in the urban forest. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2006, 5(4): 195-201.
- [4] 王效科, 苏跃波, 任玉芬, 张红星, 孙旭, 欧阳志云. 城市生态系统: 高度空间异质性. *生态学报*, 2020, 40(15): 5103-5112.
- [5] 王效科, 苏跃波, 任玉芬, 张红星, 孙旭, 欧阳志云. 城市生态系统: 人与自然复合. *生态学报*, 2020, 40(15): 5093-5102.
- [6] 王效科, 赵露, 任玉芬, 张红星, 苏芝敏, 孙旭, 欧阳志云. 城市生态学自然模拟实验研究进展. *生态学报*, 2023, 43(5): 1763-1774.
- [7] Pickett S T A, Cadenasso M L, Childers D L, McDonnell M J, Zhou W Q. Evolution and future of urban ecological science: ecology in, of, and for the city. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2016, 2(7): e01229.
- [8] Wu J G, Xiang W N, Zhao J Z. Urban ecology in China: historical developments and future directions. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 125: 222-233.
- [9] Zhou W Q, Pickett S T A, Cadenasso M L. Shifting concepts of urban spatial heterogeneity and their implications for sustainability. *Landscape Ecology*, 2017, 32(1): 15-30.
- [10] 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.
- [11] 李晓文, 胡远满, 肖笃宁. 景观生态学与生物多样性保护. *生态学报*, 1999, 19(3): 399-407.
- [12] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局. *生态学报*, 1999, 19(1): 8-15.
- [13] 吴兆录, 闫海忠. 生物多样性保护的一个理论框架. *生物多样性*, 1996, 4(1): 26-31.
- [14] 张惠远, 张强, 胡旭珺. 共建地球生命共同体: 生物多样性保护的中国方案、世界行动. *世界环境*, 2020(2): 19-21.
- [15] 王海洋, 王浩琪, 陈禧悦, 韩宝龙, 束承继, 张童, 丁仕宇. 国内外城市生物多样性评价与提升研究综述. *生态学报*, 2023, 43(8): 2995-3006.
- [16] 杨军. 大数据与城市生态学的未来: 从概念到结果. *中国科学: 地球科学*, 2020, 50(10): 1339-1353.
- [17] Des Roches S, Brans K I, Lambert M R, Rivkin L R, Savage A M, Schell C J, Correa C, De Meester L, Diamond S E, Grimm N B, Harris N C, Govaert L, Hendry A P, Johnson M T J, Munshi-South J, Palkovacs E P, Szulkin M, Urban M C, Verrelli B C, Alberti M. Socio-eco-evolutionary dynamics in cities. *Evolutionary Applications*, 2021, 14(1): 248-267.
- [18] Alberti M. Eco-evolutionary dynamics in an urbanizing planet. *Trends in Ecology & Evolution*, 2015, 30(2): 114-126.
- [19] Alberti M, Palkovacs E, Roches S, Meester L, Brans K, Govaert L, Grimm N B, Harris N C, Hendry A P, Schell C J, Szulkin M, Munshi-South J, Urban M C, Verrelli B C. The complexity of urban eco-evolutionary dynamics. *BioScience*, 2020, 70(9): 772-793.
- [20] 魏辅文, 聂永刚, 苗海霞, 路浩, 胡义波. 生物多样性丧失机制研究进展. *科学通报*, 2014, 59(6): 430-437.
- [21] 姬晓娜. 城市生物多样性保护的景观规划途径. *城市问题*, 2006(6): 16-20.
- [22] 关文彬, 谢春华, 马克明, 牛健植, 赵玉涛, 汪西林. 景观生态恢复与重建是区域生态安全格局构建的关键途径. *生态学报*, 2003, 23(1): 64-73.
- [23] Aronson M F J, La Sorte F A, Nilon C H, Katti M, Goddard M A, Lepczyk C A, Warren P S, Williams N S G, Cilliers S, Clarkson B, Dobbs C, Dolan R, Hedblom M, Klotz S, Kooijmans J L, Kühn I, Macgregor-Fors I, McDonnell M, Mörtberg U, Pysek P, Siebert S, Sushinsky J, Werner

- P, Winter M. A global analysis of the impacts of urbanization on bird and plant diversity reveals key anthropogenic drivers. *Proceedings Biological Sciences*, 2014, 281(1780): 20133330.
- [24] 陈利顶, 李秀珍, 傅伯杰, 肖笃宁, 赵文武. 中国景观生态学发展历程与未来研究重点. *生态学报*, 2014, 34(12): 3129-3141.
- [25] 毛齐正, 马克明, 邬建国, 唐荣莉, 张育新, 罗上华, 宝乐, 蔡小虎. 城市生物多样性分布格局研究进展. *生态学报*, 2013, 33(4): 1051-1064.
- [26] Ren Q, He C Y, Huang Q X, Shi P J, Zhang D, Güneralp B. Impacts of urban expansion on natural habitats in global drylands. *Nature Sustainability*, 2022, 5(10): 869-878.
- [27] Batúry P, Kurucz K, Suarez-Rubio M, Chamberlain D E. Non-linearities in bird responses across urbanization gradients: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 2018, 24(3): 1046-1054.
- [28] Carbó-Ramírez P, Zuria I. The value of small urban greenspaces for birds in a Mexican city. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 100(3): 213-222.
- [29] Sun B, Lu Y L, Yang Y F, Yu M Z, Yuan J J, Yu R, Bullock J M, Stenseth N C, Li X, Cao Z W, Lei H J, Li J L. Urbanization affects spatial variation and species similarity of bird diversity distribution. *Science Advances*, 2022, 8(49): eade3061.
- [30] 郭诗怡, 斋藤馨, 夏原由博, 曹洋. 城市建成环境对鸟类多样性的影响机制研究评述及展望. *中国园林*, 2022, 38(2): 71-76.
- [31] Schmidt C, Domaratzki M, Kinnunen R P, Bowman J, Garroway C J. Continent-wide effects of urbanization on bird and mammal genetic diversity. *Proceedings Biological Sciences*, 2020, 287(1920): 20192497.
- [32] Verrelli B C, Alberti M, Des Roches S, Harris N C, Hendry A P, Johnson M T J, Savage A M, Charmantier A, Gotanda K M, Govaert L, Miles L S, Rivkin L R, Winchell K M, Brans K I, Correa C, Diamond S E, Fitzhugh B, Grimm N B, Hughes S, Marzluff J M, Munshi-South J, Rojas C, Santangelo J S, Schell C J, Schweitzer J A, Szulkin M, Urban M C, Zhou Y Y, Ziter C. A global horizon scan for urban evolutionary ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 2022, 37(11): 1006-1019.
- [33] Turrini T, Knop E. A landscape ecology approach identifies important drivers of urban biodiversity. *Global Change Biology*, 2015, 21(4): 1652-1667.
- [34] Halstead K E, Alexander J D, Hadley A S, Stephens J L, Yang Z Q, Betts M G. Using a species-centered approach to predict bird community responses to habitat fragmentation. *Landscape Ecology*, 2019, 34(8): 1919-1935.
- [35] Suhonen J, Jokimäki J, Kaisanlahti-Jokimäki M L, Morelli F, Benedetti Y, Rubio E, Pérez-Contreras T, Sprau P, Tryjanowski P, Møller A P, Díaz M, Ibáñez-Álamo J D. Occupancy-frequency distribution of birds in land-sharing and-sparing urban landscapes in Europe. *Landscape and Urban Planning*, 2022, 226: 104463.
- [36] Zúñiga-Vega J J, Solano-Zavaleta I, Sáenz-Escobar M F, Ramírez-Cruz G A. Habitat traits that increase the probability of occupancy of migratory birds in an urban ecological reserve. *Acta Oecologica*, 2019, 101: 103480.
- [37] Polakowska A E, Fortin M J, Couturier A. Quantifying the spatial relationship between bird species' distributions and landscape feature boundaries in southern Ontario, Canada. *Landscape Ecology*, 2012, 27(10): 1481-1493.
- [38] Hughes A C, Orr M C, Lei F M, Yang Q M, Qiao H J. Understanding drivers of global urban bird diversity. *Global Environmental Change*, 2022, 76: 102588.
- [39] Kattwinkel M, Strauss B, Biedermann R, Kleyer M. Modelling multi-species response to landscape dynamics: mosaic cycles support urban biodiversity. *Landscape Ecology*, 2009, 24(7): 929-941.
- [40] Callaghan C T, Bino G, Major R E, Martin J M, Lyons M B, Kingsford R T. Heterogeneous urban green areas are bird diversity hotspots: insights using continental-scale citizen science data. *Landscape Ecology*, 2019, 34(6): 1231-1246.
- [41] Grafius D R, Corstanje R, Warren P H, Evans K L, Norton B A, Siriwardena G M, Pescott O L, Plummer K E, Mears M, Zawadzka J, Richards J P, Harris J A. Using GIS-linked Bayesian Belief Networks as a tool for modelling urban biodiversity. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 189: 382-395.
- [42] Grafius D R, Corstanje R, Siriwardena G M, Plummer K E, Harris J A. A bird's eye view: using circuit theory to study urban landscape connectivity for birds. *Landscape Ecology*, 2017, 32(9): 1771-1787.
- [43] Milanovich J R, Peterman W E, Barrett K, Hopton M E. Do species distribution models predict species richness in urban and natural green spaces? A case study using amphibians. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 107(4): 409-418.
- [44] Rodríguez J P, Brotons L, Bustamante J, Seoane J. The application of predictive modelling of species distribution to biodiversity conservation. *Diversity and Distributions*, 2007, 13(3): 243-251.
- [45] Prihandi D R, Nurvianto S. The role of urban green space design to support bird community in the urban ecosystem. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 2022, 23(4): 2137-2145.
- [46] Planillo A, Fiechter L, Sturm U, Voigt-Heucke S, Kramer-Schadt S. Citizen science data for urban planning: comparing different sampling

- schemes for modelling urban bird distribution. *Landscape and Urban Planning*, 2021, 211: 104098.
- [47] Peng J, Liu Y X, Corstanje R, Meersmans J. Promoting sustainable landscape pattern for landscape sustainability. *Landscape Ecology*, 2021, 36 (7): 1839-1844.
- [48] Dong J Q, Jiang H, Gu T W, Liu Y X, Peng J. Sustainable landscape pattern: a landscape approach to serving spatial planning. *Landscape Ecology*, 2022, 37(1): 31-42.
- [49] Zhou B B, Wu J G, Anderies J M. Sustainable landscapes and landscape sustainability: a tale of two concepts. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 189: 274-284.
- [50] Shen Z H, Li Y Y, Yang K, Chen L F. The emerging cross-disciplinary studies of landscape ecology and biodiversity in China. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(7): 1063-1080.
- [51] Beninde J, Veith M, Hochkirch A. Biodiversity in cities needs space: a meta-analysis of factors determining intra-urban biodiversity variation. *Ecology Letters*, 2015, 18(6): 581-592.
- [52] 徐溯源, 沈清基. 城市生物多样性保护——规划理想与实现途径. *现代城市研究*, 2009, 24(9): 12-18.
- [53] 周华锋, 傅伯杰. 景观生态结构与生物多样性保护. *地理科学*, 1998, 18(5): 472-478.
- [54] 俞孔坚, 李迪华, 段铁武. 生物多样性保护的景观规划途径. *生物多样性*, 1998, 6(3): 205-212.
- [55] Dale S. Urban bird community composition influenced by size of urban green spaces, presence of native forest, and urbanization. *Urban Ecosystems*, 2018, 21(1): 1-14.
- [56] Callaghan C T, Palacio F X, Benedetti Y, Morelli F, Bowler D E. Large-scale spatial variability in urban tolerance of birds. *The Journal of Animal Ecology*, 2023, 92(2): 403-416.
- [57] 赵伊琳, 王成, 白梓彤, 郝泽周. 城市化鸟类群落变化及其与城市植被的关系. *生态学报*, 2021, 41(2): 479-489.
- [58] Callaghan C T, Major R E, Lyons M B, Martin J M, Kingsford R T. The effects of local and landscape habitat attributes on bird diversity in urban greenspaces. *Ecosphere*, 2018, 9(7): e02347.
- [59] Xu X, Xie Y J, Qi K, Luo Z K, Wang X R. Detecting the response of bird communities and biodiversity to habitat loss and fragmentation due to urbanization. *Science of the Total Environment*, 2018, 624: 1561-1576.
- [60] Aznarez C, Svenning J C, Taveira G, Baró F, Pascual U. Wilderness and habitat quality drive spatial patterns of urban biodiversity. *Landscape and Urban Planning*, 2022, 228: 104570.
- [61] Cao Y, Carver S, Yang R. Mapping wilderness in China: comparing and integrating Boolean and WLC approaches. *Landscape and Urban Planning*, 192: 103636.
- [62] Spanowicz A G, Jaeger J A G. Measuring landscape connectivity: on the importance of within-patch connectivity. *Landscape Ecology*, 2019, 34 (10): 2261-2278.
- [63] 刘海龙, 王茜, 宋洋, 蒋晓玥. 北京第二绿化隔离地区以鸟类为主的城市生物多样性保护规划途径. *中国园林*, 2022, 38(10): 6-13.
- [64] 张思凝, 吴然. 基于 Citespace 知识图谱分析国际城市生物多样性研究. *生态科学*, 2022, 41(6): 211-221.
- [65] 孙然好, 孙龙, 苏旭坤, 陈利顶. 景观格局与生态过程的耦合研究: 传承与创新. *生态学报*, 2021, 41(1): 415-421.
- [66] 庄艳美, 孔繁花, 尹海伟, 张琳琳, 孙振如. 城市绿地空间格局对鸟类群落影响的研究进展. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2012, 36 (3): 131-136.
- [67] 陈利顶, 景永才, 孙然好. 城市生态安全格局构建: 目标、原则和基本框架. *生态学报*, 2018, 38(12): 4101-4108.
- [68] 岳邦瑞, 康世磊, 江畅. 城市—区域尺度的生物多样性保护规划途径研究. *风景园林*, 2014(1): 42-46.
- [69] Lepczyk C A, La Sorte F A, Aronson M F J, Goddard M A, MacGregor-Fors I, Nilon C H, Warren P S. Global patterns and drivers of urban bird diversity. Murgui E, Hedblom M. *Ecology and Conservation of Birds in Urban Environments*. Cham: Springer, 2017: 13-33.
- [70] 刘世梁, 侯笑云, 尹艺洁, 成方妍, 张月秋, 董世魁. 景观生态网络研究进展. *生态学报*, 2017, 37(12): 3947-3956.
- [71] Peng J, Pan Y J, Liu Y X, Zhao H J, Wang Y L. Linking ecological degradation risk to identify ecological security patterns in a rapidly urbanizing landscape. *Habitat International*, 2018, 71: 110-124.
- [72] Weber T, Sloan A, Wolf J. Maryland's Green Infrastructure Assessment: development of a comprehensive approach to land conservation. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 77(1/2): 94-110.