

DOI: 10.5846/stxb201112141907

毛齐正, 马克明, 鄢建国, 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.

Mao Q Z, Ma K M, Wu J G, Tang R L, Zhang Y X, Luo S H, Bao L, Cai X H. An overview of advances in distributional pattern of urban biodiversity. Acta Ecologica Sinica 2013, 33(4): 1051–1064.

## 城市生物多样性分布格局研究进展

毛齐正<sup>1</sup>, 马克明<sup>1\*</sup>, 鄢建国<sup>2,3</sup>, 唐荣莉<sup>1</sup>, 张育新<sup>1</sup>, 罗上华<sup>1</sup>, 宝乐<sup>1</sup>, 蔡小虎<sup>4</sup>

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085;

2. 内蒙古大学中美生态、能源及可持续性科学研究中心, 呼和浩特 010021;

3. 美国亚利桑那州立大学生命科学学院和全球可持续性科学研究所, Tempe, AZ, USA; 4. 四川省林业科学研究院, 成都 610081)

**摘要:** 城市生物多样性分布格局由自然生态环境和城市化过程所决定; 其动态和机理与自然生态系统迥然不同。城市生物多样性为城市生态系统提供了诸多生态系统功能和服务, 对改善城市环境、维持城市可持续发展有着重要的意义和作用。城市化过程深刻改变了城市的生物多样性分布格局, 导致了诸如本地物种多样性降低、外来物种多样性增加、物种同质化等一系列问题。近年来, 城市生物多样性受到学界高度关注, 大量研究结果既回答了一些关键性问题, 又提出了诸多新的论题和挑战。分析了当前城市生物多样性分布格局研究的若干热点问题, 总结了影响城市生物多样性格局的主要因素, 探讨了城市生物多样性格局研究方法的关键问题, 指出了未来城市生物多样性研究的发展方向, 特别强调了城市生物多样性的生态系统功能研究在未来城市生物多样性研究中的重要地位。

**关键词:** 城市生态学; 城市生物多样性; 生物多样性格局和尺度; 城市生态系统功能和服务

### An overview of advances in distributional pattern of urban biodiversity

MAO Qizheng<sup>1</sup>, MA Keming<sup>1\*</sup>, WU Jianguo<sup>2,3</sup>, TANG Rongli<sup>1</sup>, ZHANG Yuxin<sup>1</sup>, LUO Shanghua<sup>1</sup>, BAO Le<sup>1</sup>, CAI Xiaohu<sup>4</sup>

1 Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100085, China

2 Sino-US Center for Conservation, Energy, and Sustainability Science, Inner Mongolia University, Hohhot, 010021, China

3 School of Life Sciences and Global Institute of Sustainability, Arizona State University, Tempe, AZ 85287, USA

4 Sichuan Academy of Forestry, Chengdu 610081, China

**Abstract:** Urban biodiversity pattern is determined primarily by the local environmental conditions and urbanization processes; its dynamics and underlying mechanisms are fundamentally different from those in natural ecosystems. Nevertheless, biodiversity in urban areas provides a number of ecosystem functions and services which are critically important for improving urban environmental quality and maintaining urban sustainability. Over the world, urbanization has intensely affected the distributional pattern of biodiversity within and around cities, resulting in a series of problems such as reduced native biodiversity, increased exotic biodiversity, and species homogenization of the flora or fauna in an urban landscape. Here we review a number of recent advances in urban biodiversity research by selecting a set of key topics. We find that animal richness has declined definitely without human intervention; Whether urban environment can cause decreasing (or increasing) in plant diversity is still an arguable question, but native and exotic plant species correlate positively in urban environment. Land use change, landscape pattern, climate change, local environment and particularly socio-economic factors affect the distribution pattern of urban plants diversity significantly. Urban landscape has dual effects

基金项目: 国家林业局林业公益性行业科研专项(201104026)

收稿日期: 2011-12-14; 修订日期: 2012-08-15

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mkm@rcees.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

on biodiversity pattern: landscape fragmentation and natural vegetation disappearance cause decreasing and extinction of native species, while heterogeneous habitats will potentially increase species diversity. We suggest that the selection of a proper temporal-spatial scale is the first step in urban biodiversity study and using qualitative or quantitative urbanization gradient is based on specific question and extent of the study. The species-area relationship and moderate disturbance hypothesis in urban environment needs verified further and. In particular, we emphasize that urban biodiversity research is essential for understanding and maintaining ecosystem functions and services in urban landscapes and deserves a further exploration.

**Key Words:** Urban ecology; urban biodiversity; biodiversity pattern and scale; urban ecosystem function and services

生物多样性为城市生态系统提供了一系列的生态服务和生态功能,如保护城市自然生态及本地物种、降低城市热岛效应、减少能量的损耗、净化城市受污染、美化城市环境等;此外,城市生物多样性不仅满足了城市居民的文化娱乐需求,而且对提高城市居民的环境保护意识有着重要的社会价值,对城市环境的改善和城市的可持续发展具有重要的作用和意义<sup>[1-4]</sup>。然而,城市的扩展也深刻地改变了生物多样性分布格局和作用。诸多研究表明,城市化是生物多样性降低、外来种入侵和本地种灭绝的重要原因,城市物种组成的同质性也使城市生物多样性面临着重要的挑战<sup>[4-5]</sup>;全球气候变化、城市景观的破碎化以及异质性、人类活动干扰是改变城市生物多样性分布格局的直接因素;城市化对生物多样性的影响是一个复杂的过程,诸多因素共同决定了城市生物多样性分布格局。因此,本文在对城市生物多样性格局正确认识的基础上,探索了影响城市生物多样性格局关键因素,将有利于更好地管理和保护生物多样性,并更好地保护城市自然生态系统和改善复杂的城市环境。

19 世纪 40 年代,城市生物多样性的研究始于德国、英国等欧洲国家,继而在日本等国发展,并于 80—90 年代在西方各国开始成为生态学研究热点之一,近年在中国也逐渐成为新的研究动向。目前,城市生物多样性已经成为生态学研究的新热点。尽管如此,由于研究方法的多样性和城市环境的复杂性,城市生物多样性研究仍处于探索阶段。本文综述了城市生物多样性分布格局研究的热点问题,总结了影响城市生物多样性格局的关键因素,明确了城市生物多样性研究方法的关键问题,分析了城市生物多样性研究中存在的缺陷,并提出了未来城市生物多样性研究的发展方向。

## 1 城市生物多样性研究的热点问题

### 1.1 城市生物多样性分布格局

城市生物多样性研究中,由于研究对象、研究目标以及研究的区域不同,对城市化生物多样性格局的论证存在一定的差异。尽管如此,大量研究表明,城市化显著增加了生物多样性,且植物多样性的增加幅度远大于其他城市生物,主要原因有:

(1) 生物生态幅的差异 城市景观破碎化造成了一系列面积迥异的植被斑块,各种植被斑块相互交错并形成了异质性和多样化的景观,为城市生物提供了多样化的生境<sup>[6]</sup>。植物的生态幅范围较窄,在多样化的生境中适应并保持了较高的物种多样性;动物的生态活动范围及所需求的生境远远大于植物,破碎化的景观不但使其失去原有的生境,而且直接阻隔了城市动物的活动,从而降低了动物的繁殖几率。Michael 综合 105 篇城市生物多样性的研究发现,65% 的研究证实了植物多样性增加,20% 的研究证明无脊椎动物多样性增加,仅 12% 的研究证明脊椎动物多样性的增加<sup>[7-8]</sup>。尽管如此,与城市植物多样性的研究相比,当前对城市动物多样性的研究较少,且主要集中在一些鸟类和脊椎动物,而对无脊椎动物的研究涉及较少,所以城市动物群落的多样性分布格局还有待进一步的研究和认证。

(2) 外来物种的引进 城市绿化过程中引进了大量的外来物种,且引入数量和速率远远超过了本地种消失的速率<sup>[9]</sup>,这是城市植物多样性增加的重要原因;而城市动物在逐渐丧失生境的同时却没有获取同样的机会。尽管如此,有关城市动物多样性的分布格局,大多数学者还是认为城市破碎化的生境大大降低了无脊椎

动物和脊椎动物尤其是鸟类的多样性,原因主要是城市动物生境的丧失导致了一些本地种的灭绝,尤其是一些较大面积的绿地植被逐渐被城市建筑用地所代替。此外,有相当一部分学者认为,城市生物多样性与城市化发展强度密切相关。研究发现,中度发展城市的生物多样性最高,城市化强度较高的城市生物多样性最低;在同一城市的不同城市发展阶段,以城市发展强度居中的区域其生物多样性达到最高,尤其在城市土地利用转变较为剧烈的近郊区或远郊区,其生物多样性不仅高于城市中心区域,而且显著大于当地的自然生态系统<sup>[10]</sup>。城市生物多样性这一分布格局的特点与传统生态学的中度干扰理论相吻合<sup>[11-12]</sup>。主要原因可能是:处于中度人为干扰水平的中等城市化强度的区域,土地利用转变剧烈及土地利用类型多样化形成了异质性的生境,而多样化的生境维持了更高的生物多样性。尽管如此,中度干扰机制对城市生物多样性分布格局的影响对不同的物种表现可能不同,对植物多样性增加的影响可能远大于其他城市生物<sup>[8]</sup>。

综上,城市生物多样性的分布格局取决于多种因素,不同区域以及同一区域不同物种对城市化的响应均存在差异,甚至不同的城市化发展阶段对生物多样性分布格局的影响也明显不同。但是,在整个城市化背景下,仍然可以看到大致的变化趋势,即城市植物多样性显著增加的同时脊椎动物多样性显著降低。所以,在未来的城市生物多样性研究中,必须明确研究的区域,研究的尺度以及研究的对象,才能对城市生物多样性格局有着科学的认识,以更好的预测未来城市生物多样性格局。

### 1.2 城市外来物种/本地物种分布格局

外来物种是指那些出现在其过去或现在的自然分布范围及扩散潜力以外的物种、亚种或以下的分类单元;入侵物种是指在特定地域的生态系统中,非本地自然发生和进化,通过不同的途径从其他地区传播或迁徙并可以在自然状态下生长和繁殖的生物,多数是无意引进的且往往对当地的生态系统带来一定的危害的外来物种。城市外来物种增加和本地种消失是城市生物多样性分布格局变化的典型特点。外来物种主要分布在城区,而本地种主要分布在乡村<sup>[13]</sup>。城市外来物种的主要来源有:花园和公园的引种、城市土壤的富营养化和破碎化的生境所带来的杂草、物种沿城市道路的扩散、国际贸易来往中生物的无意识引入。城市化显著降低了本地物种的多样性,即使在城区中有本地物种出现,也大多被管理者消灭<sup>[14]</sup>。

研究发现,城市外来物种与本地种多样性均与景观异质性显著相关,高度异质性的景观其生物多样性更高,且在中度干扰水平的生境下物种多样性达到最大<sup>[15]</sup>;城市景观的破碎化增加了外来物种入侵的概率<sup>[16]</sup>。但也有研究表明,本地物种、外来物种的多样性与城市景观结构没有一定的相关性,而是由小尺度环境因素造成<sup>[17]</sup>。随着城市人口密度以及建筑物密度的增加,城市外来物种入侵以及本地种灭绝的速率逐渐增加。此外,城市物种多样性的分布与社会经济、历史文化、城市管理密切相关,这也是城市生物多样性的主要特点<sup>[18]</sup>。

传统生态学认为,外来种竞争资源的能力较强,更容易入侵本地种分布较少的生境并适应城市复杂的环境,所以,本地种和外来种呈现负相关关系,即随着外来物种多样性的增加,本地种多样性逐渐降低<sup>[19]</sup>。但在城市生态系统中,二者的关系较为复杂。有研究表明,城市外来物种更倾向于选择多种生境,并在较多本地种分布的区域同样可以成功入侵,外来种与本地种呈现正相关性<sup>[15, 20]</sup>;另有研究表明,在城市绿地植被中,本地物种更容易选择自然度较高的生境,而外来种主要分布在本地物种较少且半自然的植被生境,或本地种多样性分布虽高但以人为游憩为主的绿地中<sup>[21-22]</sup>,城郊区是外来种入侵和本地种消失的热点区域。此外,在城市不同的功能区中,本地种和外来种的分布也会出现差异,可能与二者在不同的生境和环境条件下适应城市化的机制有关<sup>[23]</sup>,但也有研究发现,城市外来种、本地种多样性与土地利用类型并没有一定的相关性,外来物种可以通过多种渠道进入城市区域<sup>[24]</sup>,主要来源于人为大量引入。

综上,城市化深刻改变了外来种、本地种的分布格局及其相互作用机制。探索城市外来种的内在和外来的入侵机制不仅可以有效的管理城市生物多样性,降低外来入侵物种带来的潜在风险,而且可以更好的保护本地物种,维持城市较高生物多样性,以更好为城市居民提供多样化的生态服务。

### 1.3 城市生物多样性的物种同质性

城市生物类群的同质化特征也是城市生物多样性研究的热点问题。城市化过程增加了城市植物多样性,

但多样性的增加并没有导致植物类群多样性的增加,城市中出现的是大多是类似的植物群落,具有相似的系统分类、类似的生活型以及生存策略。城市植物群落组成的同质性特征远比郊区高<sup>[25]</sup>。Olden 总结到在城市化影响下,北美的各种生物同质化的水平依次是:植物(22%)、鱼类(14%)、爬行动物/两栖动物(12%)、哺乳动物(9%)、鸟类(8%)。不同区域不同物种会出现一定的差异<sup>[26]</sup>。不同类型生物中,当前以城市化对植物同质性影响的研究最为广泛,且城市植物同质性特征更为明显。城市植物类群同质性的研究所涉及的指标主要有植物生活型、传粉方式、种子扩散、生命周期、叶子形态和生存策略等生态生理特性<sup>[27-29]</sup>。有研究表明,与自然耕地的物种群落相比,城市植物大多属于两年生或多年生植物、气传花粉、常绿植物、K 类型生存对策、风力和人为传播种子以及适宜光和较高养分的群落类型,但植物的生活型却没有显著的差异<sup>[27]</sup>。Knapp 等搜集并分析了中欧近三个世纪植物多样性变化,发现大部分城市植物具有中胚叶、依靠人为扩散进行传播,且更趋向选择高 N、较温暖的生境<sup>[30]</sup>;而城市动物则多趋向于边缘生境的物种以适应城市景观破碎化。更多的鸟类和食果的啮齿类动物适应并选择人工喂食的取食方式,采取乔木和灌木营造巢穴的鸟类更容易在城市生存和繁殖;城市大面积草坪和其他植被资源使一些植食性无脊椎动物的数量增加;一些体形较小的甲虫更适宜在中等人口密度的生境生存<sup>[31-34]</sup>。

导致城市生物类群同质化的原因主要有:(1)城市绿化人为引进大量的外来物种,外来种入侵和本地种消失并存;(2)全球城市都具有规则的和相似类型的生境结构,即由道路、居住区、商业区等构成的城市整体生境;(3)城市中便捷的交通成为动植物扩散的潜在通道,导致了城市生物在类群、生活型、以及基因型的相似性特征。(4)生物对城市环境的一致适应方式的内在机制<sup>[35]</sup>。以上诸多因素均是城市扩展的直接后果,Olden 等研究发现,通过人口密度量化的城市化强度与城市各种生物的同质性有着显著的相关关系,说明了城市化对生物同质性的决定性作用。但是,不同的生态系统以及不同区域物种同质性特性对城市化的响应程度均存在一定的差异性,城市物种同质性并不一定随着城市化强度的增加而增加<sup>[36]</sup>,所以,城市生物同质性特征受城市化的影响并不存在一个固定的过程和模式,而是由自然和人为多重因素综合作用的结果。但是,城市植物多样性下降有可能降低植物应对环境变化的能力,并影响其生态功能的发挥。所以,在保护城市生物多样性的过程中,不仅仅要保持较高的物种丰富度,也要保护不同类群、不同来源的物种,维护生物多样性的可持续性以应对未来环境变化的能力。此外,外来物种的引进是导致城市生物同质化的主要原因,所以,保护本地物种多样性及其生境也是降低物种同质化进程的重要手段。

## 2 影响城市生物多样性格局的主要因素

城市生态系统是复杂的综合体,是由各种景观要素有序或无序所组成的镶嵌体。影响城市生物多样性分布格局的因素有很多,包括生物因素和非生物因素,也可称为内在因素和外在因素。生物因素主要包括生物之间的相互竞争,如本地种外来种之间的竞争,动物捕食者与被捕食者的关系等;非生物因素主要包括气候、海拔、地形、气候、土壤特征、大气污染等。城市景观格局也是影响城市生物多样性的关键因子,城市景观破碎化对城市生物多样性产生了重要的影响。此外,区别于自然生态系统,城市生物多样性与人类社会经济活动密切相关,在城市的发展过程中,人类的决策和行为极大地改变了城市生物多样性<sup>[37-38]</sup>。综合影响城市生物多样性分布格局、城市生物外来种、本地种分布的驱动因子和生物同质性的影响因素,并结合国内外对城市生物多样性影响因子的研究,确定影响城市生物多样性分布格局的因子主要是土地利用转变、气候变化、城市景观格局变化、城市社会经济活动、城市微环境等关键因子。

### 2.1 土地利用

城市扩展是土地利用转变的直接驱动力,城市化使越来越多的森林、草地等自然生态系统转化为城市生态系统。土地利用转变是生物多样性格局改变的重要推动因子,城市化过程、城市化强度以及城市生态系统内部的土地利用格局都显著改变了城市生物多样性分布格局。

城市化过程即是土地利用类型转变的过程,从城郊区到城市中心,不同土地利用类型的生物多样性呈现出显著的差异。Walker 等分析了美国亚利桑那州城市化对植物多样性的影响,结果显示,远郊区沙漠地带植

生物多样性最高,城市中心居中而近郊区的农业区最低,但物种均匀度以城市用地和近郊区的农业区最高,沙漠区最低<sup>[39]</sup>。沿着城市化梯度,从乡村的自然生态系统到近郊区再到典型的城市用地区域,城市生物多样性显著降低或增加<sup>[40-43]</sup>,这也是土地利用类型转变直接或间接改变生态过程的结果。一般认为,城市植物多样性大于紧邻的自然用地,而动物多样性尤其是鸟类在城市区域中显著降低;本地种主要分布在自然度较高的城市绿地,而外来种主要分布在人为活动较频繁的城市区域;土地利用类型较为复杂的城郊区其生物多样性可能高于城区和远郊区。可见,城市生物多样性与城市化发展紧密相关,而土地利用转变是决定多样性格局的重要推动力。

此外,城市内部不同土地利用类型的生物多样性也存在着显著的差异。如城市行道树生物多样性最低,而城市草坪、居住区花园、大面积的城市隔离带等管理强度较低的植被类型生物多样性较高,面积较小的城市荒地以及屋顶植被绿化的多样性也较低<sup>[10]</sup>;同时城市周围大面积的植被绿化带的灌木类型本地种多样性远大于城区的商业用地和工业区植被,相反外来种在商业区和工业区所占的比重最高<sup>[17]</sup>;此外,城市植物本地种多样性以居住区绿地和裸地的最高,交通植被带和单位绿地以及商业区绿地的本地种分布最少;而外来物种在居住区绿地植被的分布最多,其他土地利用类型没有呈现显著的差异<sup>[39]</sup>。但是,也有研究发现,城市外来入侵物种与土地利用没有相关关系,在城市高度异质性的景观中,外来物种总会在不同的土地利用类型中寻找并适应各种小环境因素<sup>[24]</sup>。所以,城市内部土地利用类型对生物多样性的影响可能与人为管理强度和各种小环境因子密切相关,在较小的尺度范围内,各种土地利用类型对生物多样性的影响并没有一定的规律,但在较大的空间尺度下,土地利用转变对城市生物多样性的分布格局却有着决定性的作用。

## 2.2 景观格局

城市是各种景观要素的镶嵌体,因其独特的环境复杂性,通常被称之为“城市综合体”。高度的景观破碎化和景观异质性是城市景观格局的主要特点。与自然生境不同,城市生物栖息地大多是由各种不同面积大小、相互隔离的绿地斑块所组成,破碎化和异质性的绿地景观对城市生物多样性格局产生了重要影响<sup>[38]</sup>。

### 2.2.1 景观破碎化

城市景观的破碎化使面积较大的城市森林退化成各较小面积的斑块,而较小面积的森林逐渐消失<sup>[44]</sup>,直接或间接造成了物种多样性的降低。诸多研究表明,城市植被斑块面积对维持物种多样性具有重要的生态学意义。城市鸟类多样性格局符合经典生态学的种-面积关系理论,鸟类物种多样性和绿地面积成正相关,且面积较大的绿地斑块的破碎化对多样性降低的影响更大<sup>[45-46]</sup>;城市内部森林斑块、残存荒地、公园等生境的面积均与城市鸟类与植物多样性成显著的正相关关系<sup>[47-51]</sup>。此外,城市化导致的景观破碎化增加了森林斑块的边缘面积,增加了外来物种入侵的概率,直接影响了物种多样性的分布<sup>[16]</sup>。城市植物资源生境的不连续性,也直接影响到一些城市动物的行为,如城市植被覆盖度直接影响了生物的扩散,城市大面积的植被绿化带和道路廊道效应对保护城市鸟类和其他生物多样性有着重要的作用<sup>[52-53]</sup>。城市绿地斑块的破碎化不仅直接降低了植物多样性,也可能间接改变某些植物遗传后代的选择。但是,另有研究学者指出,由于城市生态系统的复杂性,城市生物多样性与植被斑块面积并没有直接的关系,而是更多的取决于异质性较高的微环境<sup>[54]</sup>。

### 2.2.2 景观异质性

景观异质性是城市景观破碎化的直接作用的结果。一些研究者认为,城市景观的异质性所产生的生境的异质性、多样化反而会维持更多的生物多样性,高度破碎化的城市化区域和城市植被结构可能并不是限制城市生物多样性的主要因素,部分生物已经对城市环境的改变产生了一定的耐受性。Scatte等通过对瑞士3种城市的节肢动物的多样性分析发现,物种多样性并没有随着城市化梯度有明显的改变趋势,这可能归因于城市异质化的景观造成的微环境差异<sup>[55]</sup>;城市生物为寻求更多的食物资源或最佳栖息地,更大的可能是逐渐突破原有的生境并选择亚优栖息地,而生境的质量比生境的位置更为重要,城市密集的建筑群落和不透水地面的景观隔离可能并不会成为生物活动的障碍<sup>[53]</sup>;Cornelis和Hermly通过对比城市公园和郊区公园发现,城市

公园的异质性大于郊区公园,公园内的植物多样性也相应的高于郊区公园<sup>[56]</sup>;在破碎化的森林斑块中,东京城区的蕨类植物丰富度也大于城郊区<sup>[57]</sup>,与城区森林的景观异质性密切相关。随着城市化密度的增强,日益增加的城市绿地的异质性会对生物多样性带来诸多的影响。

综上,城市景观格局对生物多样性格局产生了双重的影响。一方面,城市景观破碎化确实使大面积的生物生境逐渐丧失,不仅直接降低了城市物种多样性,而且增加了外来物种入侵的概率,这一观点已得到广泛的认可;另一方面,城市景观的异质性营造了多样化的生境,有利于各种来源的生物的定居和生存,多样化的生境反而支持了较高的物种多样性。所以,在保护城市生物多样性的过程中,保护较大面积的植被生境的同时,也应关注一些具有特殊的生境以保护其特有种的生存和繁衍。所以,城市景观格局规划在城市生物多样性保护中有着重要的意义。

### 2.3 气候变化

全球气候变暖是当前和未来气候变化的主要现状和重要趋势。诸多研究表明,气候变化是影响生物多样性格局的重要因素<sup>[16, 58]</sup>。首先,全球气候变暖导致了物种的灭绝及数量的降低<sup>[59]</sup>。随着温度的逐渐升高,物种的生态位逐渐从低海拔转向高海拔,一些特有种逐渐消失<sup>[60-62]</sup>;温度的升高导致一些病原菌的繁衍也是导致物种灭绝的重要原因<sup>[63-64]</sup>。此外,全球气候变暖也是外来物种入侵的重要原因。如海洋生态系统中,随着冬季海水温度的逐渐升高,在北海、地中海等地均出现了一些喜温的浮游植物和鱼类<sup>[65-66]</sup>;气候变化显著的增加了外来物种的丰富度和多度,尤其在城市生态系统中表现更为明显<sup>[67]</sup>。同时,城市化过程也是全球气候变化的重要驱动力,并进一步影响到城市生物多样性的分布格局。

城市气候温湿度、风速的改变也促使生物多样性格局发生了相应的转变。城市日益升高的温度使一些不适宜低温的植物迁移到城市区域,打破了原有的地理隔离,扩大了潜在的生态位和生态幅,并可能新的环境下逐渐占领主导地位,在一定程度上增加了外来物种入侵的概率。German 等发现,城市较高的温度促使城郊半自然生境的节肢动物迁移并定居在城市环境中;城市热岛效应使地中海的一些物种逐渐入侵到相邻的城市区域,并可能在未来威胁到本地物种<sup>[68]</sup>;调查发现,城市中喜温植物占据着更高的比例,很多来源于较温暖地区的外来植物在城市环境中生长的更好。在全球变暖的环境下,一些外来种更倾向选择温度较高的城市化生境<sup>[69]</sup>;同时一些喜湿、耐酸的植物可能正在逐渐走向灭绝<sup>[70]</sup>。城市气候的转变也影响了植物的物候<sup>[38]</sup>,植物花期、发芽期提前,休眠期、落叶期推后,整个生长期延长<sup>[71-72]</sup>。此外,城市中密集的建筑群体降低了风速,使一些种子较轻或依靠种子传播的风媒植物存在潜在的灭绝风险。如城市偏向选择依靠重力传播且个体较大的种子而不是个体较小依靠空气或风力传播的种子,而依靠土壤作为种子库的植物类型也容易逐渐走向灭绝<sup>[28, 73]</sup>。尽管如此,诸如此类的研究尚少,还应该开展广泛的研究得到进一步的考证。

### 2.4 局地环境

城市化过程剧烈改变了城市生态系统生物地球化学循环,并带来了大气污染、土壤富营养化、土壤污染、水污染等一系列的环境问题,这些问题在多重尺度上影响并改变了城市生物多样性分布格局。

大气沉降和人为输入使城市土壤比自然土壤具有更高的营养物质<sup>[74-75]</sup>,尤其是土壤有机质和氮含量在城市土壤显著增高。但是,较高的土壤养分含量在一定程度上增加了外来物种入侵的概率,尤其是大气氮沉降使城市土壤含有丰富的氮,促进了喜氮植物在城市的定居,尤其是一些外来种的入侵;一部分适宜较低氮环境的物种逐渐消失或者转向中度含量的氮环境或高氮环境<sup>[30]</sup>,间接影响了城市本地种和外来种的分布格局。Hamberg 等发现,较高的土壤肥力可能是引起欧洲花楸(*Sorbus aucuparia*) 在北美城市森林广泛分布的重要原因,城市森林边缘欧洲花楸的数量与城市大量养分的输入密切相关<sup>[76]</sup>,这是因为欧洲花楸适应较为肥沃的土壤,在土壤氮、磷、钾充足的情况下会生产更多的花和种子,城市土壤较高的 C/N 直接或间接促进了该植物的生长和繁殖。

城市景观格局在区域尺度上改变了城市生物多样性的格局,在小尺度上,城市建筑类型、道路结构等小环境因素也会影响城市生物多样性的分布。有研究表明,外来物种丰富度与道路的管理强度和结构特征如道路

边缘的干扰特征、道路宽度以及距城市中心的距离有一定的相关性<sup>[77]</sup>;此外,城市道路的噪音污染、动物交通事故对生物生存环境造成了潜在的威胁;不同的土地利用类型如城市草坪、森林的鸟类结构组成也会呈现一定的差异;具备较高乔木多样性、灌木多样性的生境是城市动物主要的栖息地,城市绿地植被结构特征对鸟类多样性的保护也许比周围景观格局更具实际意义<sup>[78]</sup>。

## 2.5 社会经济

人为引入外来物种是城市植物生物多样性增加的主要原因<sup>[30]</sup>。在城市建设中,城市绿化引进的外来的乔木和灌木显著的增加了城市植物多样性。城市中植物园、公园以及居住区花园的物种多样性明显大于其他植被系统。这些引进的植物大多是常绿或花期较长的植物,或者是一类可以有效吸收大气污染物、净化土壤和空气的特有植物。城市规划决策者对城市生物多样性有决定性的作用,居民的意向性选择可能远大于生境面积对植物多样性的贡献<sup>[51]</sup>。此外,伴随着国际化进程的加快,国际贸易和交通成为外来种传播的重要途径<sup>[79]</sup>,是人类无意识的引入入侵种的主要通道。

城市植物多样性与社会经济密切相关。美国凤凰城城市居民绿地中,植物多样性与居民的经济水平存在着显著的相关关系,随着收入的提高,居民会花费更多的时间和资金在绿地植被的构建,更容易营造多样化的花园<sup>[37]</sup>;城市环境的不平等性在各个城市普遍存在,经济地位较高的群体往往享有更多环境福利,大多数居住在城市公园周围或绿化较好的城市区域,或有足够的资金去绿化周围生活环境,而中低收入者一般居住在环境恶劣区域,如城市近郊区和远郊区,往往不能享受平等的环境收益。此外,城市居民的社会文化背景同样会影响到城市生物多样性的格局<sup>[40]</sup>,不同城市或同一城市的不同聚居区的物种多样性都会存在一定差异。另外,区域范围内的城市结构以及建筑物的类别都可能对城市生态系统服务功能和多样性格局分布产生重要的影响<sup>[80]</sup>。

尽管破碎化的城市生境显著降低了城市动物尤其是鸟类的多样性,但当城市居民在认识到城市生物多样性的重要性时,会通过多种途径保护城市现存的各种鸟类。如有目的的保护或建造一定面积的栖息地,或者人工喂食以吸引更多的鸟类种群,逐渐增加了城市鸟类生物多样性。Victor 等指出,在城市中为鸟类建造一些巢穴可以提高城市鸟类的定居,同时合理的规划和管理城市植被,如对乔木和灌木的适当修剪,最大可能的降低人为干扰是保护城市鸟类的重要措施<sup>[81]</sup>。城市草地频繁的施肥和修剪对节肢动物群落、直翅目均有显著的影响,高强度的人为管理直接降低了城市草坪生态系统的生物多样性<sup>[82]</sup>。与自然生态系统相似,人为干扰对城市生物多样性也有一定的影响,高强度的人为活动可能会间接导致城市生物多样性的丧失。所以,合理的管理城市植被并降低人为干扰是保护多样性的重要措施。

在城市生态系统中,人类社会经济活动的强度是决定城市生物多样性分布格局和外来物种入侵的重要机制,在某种程度上,人为活动对城市生物多样性的影响可能远大于自然环境因子。

## 3 城市生物多样性研究方法的关键问题

城市生态系统结构具有高度的异质性,是由各不同面积、不同形状、不同要素组成的动态系统。景观生态学以其强调异质性、格局-过程、多尺度的特点为城市生态学研究提供了有效的手段,时空格局的量化有效的模拟和评价了城市化过程,包括生物多样性、土壤物理化学循环、热岛效应、初级生产力的变化等生态学过程<sup>[38]</sup>。在城市生物多样性研究中,尺度、城市化梯度的研究方法是影响城市多样性格局的关键因素,可持续性研究方法是未来多样性研究的前沿问题肯主要趋势

### 3.1 尺度

尺度是景观生态学的核心问题,复杂性和变异性是尺度研究的主要特点,尺度主要包括:时间尺度、空间尺度、功能尺度。时间尺度和空间尺度是生态学研究的重点问题和探索生态学过程的主要方法,同一问题在不同的尺度上对生态要素影响的结果存在差异。尺度研究的根本目的在于通过适宜的空间和时间尺度来揭示和把握复杂的生态学规律<sup>[83-84]</sup>。影响城市生物多样性的有诸多因素,如区域尺度的气候变化,中尺度的土地利用转变和政府决策导向,以及小尺度的微观因素。不同尺度上的环境因子对城市生物多样性格局的贡献

存在差异,同时,时间尺度也是未来城市生物多样性研究的重要方面。

### 3.1.1 时间尺度

城市生物多样性在时间尺度上的研究存在诸多困难,目前多时间尺度的城市生物多样性研究相对较少。Biamonte 等通过两个时间段跨越 16 年的鸟类多样性数据,发现城市化扩展造成了哥斯达黎加东北部的一些特有的生物生境逐渐丧失,不仅导致了 32 种本地鸟类的灭绝,而且使原来 34 种以此作为停歇点的迁徙鸟类也濒临灭绝,直接证明了城市化对生物多样性的影响<sup>[85]</sup>; Vuorisalo 等通过 316 份历史报刊数据的搜集,分析了芬兰西南部图尔库哺乳动物、鸟类和爬行类在 100a 间的变化情况,提出了当地生物多样性保护的重要措施<sup>[86]</sup>。城市生物多样性时间尺度研究跨越年限最长的是 Knapp 等对中欧城市植物功能特性近 3 个世纪的变化研究,详细分析了城市植物在不同时期的生态特征的变化,不仅说明了城市化对植物的影响,而且证明了植物对城市化过程和城市环境的适应和响应,为研究城市化对生物多样性的影响机制提供了重要参考<sup>[30]</sup>。此外,不同时间尺度对生物多样性格局变化的影响可能存在差异,如在较短的时间尺度内,城市植物多样性存在增加趋势,而从较长时期来看,植物多样性却处于逐渐降低的趋势<sup>[43]</sup>。

综上,城市生物多样性在城市可持续发展中占据着重要的地位,但长期历史数据的缺乏使城市化对生物多样性的影响评价较为困难,所以,未来城市生物多样性的研究必须建立在长期监测和评价基础之上,才能对城市生物多样性进行科学有效的保护和管理。

### 3.1.2 空间尺度

城市生物多样性分布格局在不同空间尺度上对环境因子的响应也存在显著的差异,在不同的空间尺度上影响城市生物多样性的因素不一样。城市具有多样化、异质性的景观,不同区域、不同城市、不同学者在研究的过程当中可能所获得的结果存在着诸多差异,如城市生物多样性分布格局是由大尺度环境因素决定还是由小尺度微环境主导存在着一系列的争议。

普遍认为,由城市人口密度所代表的城市化干扰强度与物种多样性呈负相关关系,但 Pautasso 却发现二者的关系存在一定的尺度依赖性。从小尺度到大尺度,人口密度与物种丰富度的关系从负相关逐渐递增至正相关,在较大的区域范围内,人为选择,外来物种引进和多样化的生境是决定物种多样性的主导因素,物种多样性和人口密度相关性的尺度依赖性为城市生物多样性的保护提供了重要的参考价值<sup>[87]</sup>。Walker 发现,在群落水平上,乡村比城区的植物多样性丰富,但在整个区域,城市物种库明显大于乡村<sup>[39]</sup>。也有人指出,城市景观的破碎化和不连续性使得城市物种结构更多的依赖于小尺度环境的改变,而城市物种总是在不断的去适应各种人为干扰和人类活动,并对环境的改变作出一定的响应<sup>[6, 54-55, 88]</sup>。此外,在不同的空间尺度上,物种的相似度和基因多样性也存在着一定的差异<sup>[36, 89]</sup>。尽管如此,大多数学者认为,在区域尺度上,气候是影响生物群落的主要因素,中尺度范围内,土地利用、景观格局对生物多样性分布格局起着决定性的作用,而在小尺度范围内,生境特征、植被结构、管理强度、土壤等微环境因素可能是决定物种分布的关键因素<sup>[77, 90-91]</sup>;

因此,在研究城市生物多样性过程中,首先必须界定研究的尺度以及研究的区域范围,选择合适的城市化梯度,在不同的区域或范围内探索影响城市生物多样性的关键因素,科学认识城市生物多样性变化的机制,从而为城市生物多样性的保护和管理提供科学依据。

## 3.2 城市化梯度

城市化梯度分析是城市生态学应用较为广泛的研究方法,同时也是城市生物多样性分布格局研究的有效手段和主要方法。沿着城市化梯度,在不同的空间尺度上城市生物多样性呈现有规律的增加或降低。目前城市化梯度的分析方法大致可以分为两类,即定性城市化梯度和定量城市化梯度,二者具有各自的适应范围和相应的指标体系。

### 3.2.1 定性城市化梯度

定性城市化梯度一般采用城市化—半城市化—乡村或城市—郊区—乡村的距离模式。城市是由各种景观要素有序或无序组织起来的综合体,具有高度异质性特征,并且是连续变化的过程,因此,具有不同城市化



强度的区域更是一个相对的区域范围,所以,目前应用定性化城市梯度来了解生物多样性对城市化的响应的研究方法使用最为广泛。例如,沿着乡村到城市中心的城市化梯度,城市植物多样性逐渐增加<sup>[40-42]</sup>或降低<sup>[43]</sup>,鸟类、无脊椎动物多样性逐渐降低<sup>[92-93]</sup>;城市外来种多样性逐渐增加而本地种逐渐降低<sup>[39,94]</sup>,物种灭绝速率逐渐增加<sup>[28,85]</sup>;此外,物种的同质性也随着城市化强度的增加而增加<sup>[35]</sup>。尽管如此,定性化城市梯度仅仅适用于单个城市区域和单中心城市范围的研究,若涉及到不同城市或多个中心的城市、不同区域甚至全球的生物多样性格局的比较则不适用,这可能也是当前城市生物多样性格局研究存在较多争议的主要原因之一。此外,城市生物多样性的研究最为显著的差别是对于研究空间的选择,在研究过程中,涉及到城市化梯度的有关概念如建成区、规划区、城郊区等也必须予以明确,这些指数在不同城市以及城市化发展阶段中表现出差异性也会给城市生物多样性研究带来诸多的问题。

### 3.2.2 定量化城市梯度

遥感和地理信息系统的应用是量化土地利用、土地覆盖和景观格局的重要手段,并陆续运用到城市化研究中。城市化梯度的景观格局量化不仅使区域间城市结构的对比成为可能,而且使研究城市内部景观格局对生态过程的影响具有可行性,为探索城市生态学内在的机制和规律提供了重要的工具,具有重要的意义<sup>[42,95]</sup>。随着景观生态学的发展,量化的城市化梯度日益用到城市生物多样性研究中。有研究表明,城市生物多样性分布格局不仅与城市建筑物密度、人口密度、城市交通、土地利用的异质性水平密切相关,而且与城市绿地的空间结构密切相关<sup>[96-98]</sup>。但是,也有研究表明,城市化梯度如不透水面面积、城市景观斑块的多样性或异质性指数与物种多样性并没有直接关系,一方面可能是因为物种分布更多的由小环境因素所决定,另一方面可能是因为在不同空间尺度下,各种量化的城市化指标代表不同的环境意义<sup>[55,99]</sup>。所以在城市化研究中必须明确研究的尺度,选择合适的城市化指标,才能更客观的评价城市化对生物多样性分布格局的影响。

### 3.3 可持续研究

城市生态学研究最终目标是城市的可持续发展,城市生态学的研究不仅强调城市的生态学过程的机制研究,而且关注城市的可持续研究,即理论和实践的结合。综合自然科学和社会科学等多学科交叉研究,运用景观生态学方法是实现城市可持续发展的主要方法和途径<sup>[38,100-101]</sup>。城市生物多样性研究的最终目的是为城市生物多样性保护提供科学的理论和参考,以维持城市自然生态系统的健康,促进城市的可持续发展。所以,未来城市生物多样性的研究必须综合多学科交叉的理念,结合可持续性研究,运用景观生态学方法,从生物个体水平和区域水平开展城市生物多样性保护<sup>[102]</sup>。Groves 等提出了针对生物多样性区域保护的规划应用体系<sup>[103]</sup>,体现了可持续发展和景观生态学方法在生物多样性保护的具体应用,整个体系分为 7 个步骤:(1) 识别生物、景观或环境等保护目标;(2) 结合各种数据来源和数据处理方法,进行数据搜集和信息整合;(3) 制定具体保护目标以及任务;(4) 评价现存的保护区,明确当前保护策略的利弊;(5) 对保护目标的长期性的可能性评价;(6) 制定保护工作体系;(7) 识别优先保护区。

城市高度破碎化的景观特点决定了城市生物多样性的保护和研究不能拘泥于传统的生态学理念,而应该从多重组织水平和多空间尺度开展生物多样性研究,成功的生物多样性的保护必须结合城市经济、社会、生态的可持续发展,才能真正的体现城市生物多样性研究的目的和意义。

## 4 城市生物多样性研究的发展方向

### 4.1 加强城市生物多样性的理论研究

尽管与自然生态系统存在着巨大的差异,但有关城市生物多样性格局的研究也先后验证了几种传统生态学的经典理论,尤其是中度干扰理论和种面积关系在城市生物多样性研究得到了普遍的关注和证实。一方面,作为复杂的以人类活动为主导的生态系统,经典生态学理论在城市生态系统的进一步验证不仅巩固了经典生态学理论,而且以其独特的结构和功能为传统的生态学注入了创新思维,为生态学发展开拓了新的方向,扩大了城市生态学的应用范围,逐渐把生物多样性研究与人类社会的需要相联系,具有不可替代的实践意义和社会价值。尽管如此,由于研究区域间的异质性、城市生态系统本身的复杂性以及城市生物多样性研究方

法的差异性,经典生态学理论在城市生态系统的应用和研究还有待于进一步的验证。所以,在探索城市生物多样性研究方法的基础上,未来的研究必须建立在长期的系统性的定位研究上,以进一步证实如种面积关系和中度干扰理论以及其他生态学理论,在科学研究和实践结果的基础上,直接为城市生物多样性保护和可持续发展服务。

其次,在城市生物多样性理论研究中,外来物种和本地物种的关系也是未来研究的重点内容。城市人为引入的外来物种远超过了外来种的自然入侵,本地种和外来种的相互关系可能更为复杂。本地种的分布特征并不会成为影响外来种分布的显著因素,相反,大量的外来物种在城市复杂环境中的适应和扩散可能直接影响到本地种的生存和繁殖,并造成本地物种逐渐的消亡和灭绝。所以,在城市生物多样性研究中,外来种对本地种的影响机制研究值得关注,对城市生物多样性的保护和管理具有重要的意义和价值。

另外,城市生物的同质性研究应该继续予以关注。生物内部基因的同质性、生态特征的同质性以及物种组成的同质性不仅会间接导致城市物种多样性的降低和物种的灭绝,而且会直接影响到城市生物多样性应对全球气候变化的能力,从而直接影响生物多样性的生态系统功能并最终威胁到城市生态系统的可持续发展。

#### 4.2 探索城市生物多样性的研究方法

目前,城市生物多样性的研究结果存在很大差异,如城市化到底是降低了生物多样性或增加了生物多样性?外来物种入侵的热点区域是在城区还是城郊区?本地种和外来种是相互依存还是相互排斥?城市景观的破碎化占主导还是异质性起决定性作用?这一系列的研究都存在着很大争议,研究方法的差异可能是造成此种局面的主要原因。

首先,不同尺度上的研究都存在着显著的差异。在较大的空间或时间尺度上,城市扩展导致了生物多样性降低,而在较小的尺度范围内,物种多样性随着城市化的增强而显著增加。其次,城市化梯度的选择也会对研究结果造成一定的影响,不同城市化梯度的选择都具有局限性。如定性化城市梯度虽然存在一定的广适性,但也仅仅适用于单个城市的研究结果,不同区域和城区间没有一定的可比性;量化城市梯度的应用虽然可以解决定性化梯度的局限性,但城市生态系统内部是远比各种指标因素的简单叠加更复杂的体系,机械的运用各种景观格局指数有时候反而会因为个别位点的差异性而掩盖一些重要的规律性的信息。其次,地域差异、城市结构以及社会经济特征的差异可能是造成研究结果出现矛盾的重要原因。诸多研究表明了城市生物多样性分布格局与社会经济等因素密切相关,所以,在城市生物多样性研究中,除了景观结构的研究,其他的社会因素尤其是政策和管理更应该纳入城市生物多样性研究体系中。另外,研究对象的不同也可能造成结果的差异,城市植物多样性和动物多样性存在着显著的差异。

综上,与自然生态系统相区别,城市生物多样性的研究不应该拘泥于传统生态学方法,更应该开拓和研究适合城市生态系统的研究方法,并逐渐形成城市生物多样性完整的研究体系,在开展多时空尺度、多区域等相关长期连续性研究的基础上,最终确定城市生物多样性分布格局的共性和规律性,明确影响城市生物多样性格局的关键因子,为城市生物多样性保护提供重要的科学依据。

#### 4.3 重视城市生物多样性的生态系统功能研究

城市生物多样性是城市生态系统研究的热点问题,尤其针对城市生物多样性的分布格局与相关影响因子关系的研究范例较多。但是,作为城市植被系统的基础,生物多样性也为城市生态系统的稳定和可持续发展提供了重要的生态功能和生态服务价值,如城市植物多样性为动物提供了多样化的栖息地,同时动物又是植物种子和花粉传播的重要媒介;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服务。尽管如此,目前的城市生物多样性研究对其生态服务功能的研究却很少涉及。重点应该关注:

(1) 城市生物多样性结构与功能的关系 如不同区域或同一区域内部不同位置生物多样性所具有的生态功能的差异性;以及城市生物多样性分布结构对整个城市生态系统的影响。

(2) 外来物种、入侵物种的危害 外来物种、入侵物种使城市生态系统面临着一系列的生态风险,在研究的过程当中不能仅仅局限于对其分布格局的研究,更应该关注于外来物种、入侵物种在城市的分布对生态系

统带来的直接或间接的生态风险以及给城市居民带来的潜在的健康风险,并预测未来可能发生的重大的灾害,及时去调整和管理这些外来入侵物种,降低对城市可持续发展的危害。

(3) 城市植物与动物的关系 与传统的生态系统相比,城市生态系统受人为影响较大,植物与动物的相互关系更为复杂。如植物的栖息地功能,动物传粉功能均发生了相应的改变,研究和探讨生物在城市生态系统中功能的改变也是城市生物多样性功能研究的主要内容。

所以,在未来城市生物多样性的研究中,在基础研究的理论上,应积极的开展有关生物多样性生态服务功能的研究,以为城市的规划和建设提供科学性和建设性的对策和建议。

## 5 结语

城市生物多样性格局在很大程度上决定了城市景观的生态系统功能与服务,因此对城市可持续发展有着重要的意义。尽管如此,城市生物多样性仍旧停留在基础研究的探索阶段,由于城市生态系统本身的复杂性和研究方法的局限性,有关城市生物多样性分布格局还存在着诸多争议。在未来城市生物多样性研究中,不仅需要继续探索城市生物多样性研究方法,而且需要建立长期的连续的多时空尺度的研究范式,综合考虑城市自然背景特征并关注人类活动在城市生物多样性变化中的作用,进一步取得理论研究的突破,并着力开展城市生物多样性的生态系统功能与服务研究,从而为城市生物多样性保护和管理,城市的规划和建设提供重要的科学依据,维护城市生态系统的可持续发展。

## References:

- [ 1 ] Bolund P, Hunhammar S. Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics*, 1999, 29( 2 ): 293–301.
- [ 2 ] Miller J R. Biodiversity conservation and the extinction of experience. *Trends in Ecology and Evolution*, 2005, 20( 8 ): 430–434.
- [ 3 ] Miller J R. Restoration, reconciliation, and reconnecting with nature nearby. *Biological Conservation*, 2006, 127( 3 ): 356–361.
- [ 4 ] McKinney M L. Urbanization, biodiversity, and conservation. *Bioscience*, 2002, 52( 10 ): 883–890.
- [ 5 ] Czech B, Krausman P R, Devers P K. Economic associations among causes of species endangerment in the United States. *Bioscience*, 2000, 50( 7 ): 593–601.
- [ 6 ] Kühn I, Brandl R, Klotz S. The flora of German cities is naturally species rich. *Evolutionary Ecology Research*, 2004, 6( 5 ): 749–764.
- [ 7 ] Gaston K J, Quinn R M, Blackburn T M, Eversham B C. Species-range size distributions in Britain. *Ecography*, 1998, 21( 4 ): 361–370.
- [ 8 ] McKinney M L. Effects of urbanization on species richness: a review of plants and animals. *Urban Ecosystems*, 2008, 11( 2 ): 161–176.
- [ 9 ] DF S, JH B, EP W, SD G. The dynamics of species invasions: insights into the mechanisms that limit species diversity // Sax D F, Stachowicz J J, Gaines SD. *Species Invasions: Insights into Ecology, Evolution and Biogeography*. Sunderland: Sinauer, 2005: 447–466.
- [ 10 ] Zerbe S, Maurer U, Schmitz S, Sukopp H. Biodiversity in Berlin and its potential for nature conservation. *Landscape and Urban Planning*, 2003, 62( 3 ): 139–148.
- [ 11 ] Blair R B, Launer A E. Butterfly diversity and human land use: species assemblages along an urban gradient. *Biological Conservation*, 1997, 80( 1 ): 113–125.
- [ 12 ] Germaine S S, Wakeling B F. Lizard species distributions and habitat occupation along an urban gradient in Tucson, Arizona, USA. *Biological Conservation*, 2001, 97( 2 ): 229–237.
- [ 13 ] Wang Y G, Meng D P, Zhu Y E, Zhang F. Impacts of regional urbanization development on plant diversity within boundary of built-up areas of different settlement categories in Jinzhong Basin, China. *Landscape and Urban Planning*, 2009, 91( 4 ): 212–218.
- [ 14 ] Doody B J, Sullivan J J, Meurk C D, Stewart G H, Perkins H C. Urban realities: the contribution of residential gardens to the conservation of urban forest remnants. *Biodiversity and Conservation*, 2010, 19( 5 ): 1385–1400.
- [ 15 ] Deuschewitz K, Lausch A, Kühn I, Klotz S. Native and alien plant species richness in relation to spatial heterogeneity on a regional scale in Germany. *Global Ecology and Biogeography*, 2003, 12( 4 ): 299–311.
- [ 16 ] Thomas C D, Bodsworth E J, Wilson R J, Simmons A D, Davies Z G, Musche M, Conradt L. Ecological and evolutionary processes at expanding range margins. *Nature*, 2001, 411( 6837 ): 577–581.
- [ 17 ] van Heezik Y, Smyth A, Mathieu R. Diversity of native and exotic birds across an urban gradient in a New Zealand city. *Landscape and Urban Planning*, 2008, 87( 3 ): 223–232.
- [ 18 ] Brunzel S, Fischer S F, Schneider J, Jetzkowitz J, Brandl R. Neo- and archaeophytes respond more strongly than natives to socio-economic mobility and disturbance patterns along an urban-rural gradient. *Journal of Biogeography*, 2009, 36( 5 ): 835–844.
- [ 19 ] Elton C S. *The Ecology of Invasions by Animals and Plants*. Chicago: University of Chicago Press, 2000.
- [ 20 ] Ricotta C, Godefroid S, Rocchini D. Patterns of native and exotic species richness in the urban flora of Brussels: rejecting the ‘rich get richer’ model. *Biological Invasions*, 2010, 12( 1 ): 233–240.

- [21] Millard A. Semi-natural vegetation and its relationship to designated urban green space at the landscape scale in Leeds, UK. *Landscape Ecology*, 2008, 23(10): 1231–1241.
- [22] Pauchard A, Aguayo M, Peña E, Urrutia R. Multiple effects of urbanization on the biodiversity of developing countries: The case of a fast-growing metropolitan area (Concepción, Chile). *Biological Conservation*, 2006, 127(3): 272–281.
- [23] Celesti-Grapo L, Pyšek P, Jarošík V, Blasi C. Determinants of native and alien species richness in the urban flora of Rome. *Diversity and Distributions*, 2006, 12(5): 490–501.
- [24] Gulezian P Z, Nyberg D W. Distribution of invasive plants in a spatially structured urban landscape. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 95(4): 161–168.
- [25] Knapp S, Kuhn I, Schweiger O, Klotz S. Challenging urban species diversity: contrasting phylogenetic patterns across plant functional groups in Germany. *Ecology Letters*, 2008, 11(10): 1054–1064.
- [26] Olden J D, Poff N L, McKinney M L. Forecasting faunal and floral homogenization associated with human population geography in North America. *Biological Conservation*, 2006, 127(3): 261–271.
- [27] Lososová Z, Chytrý M, Kühn I, Hájek O, Horáková V, Pyšek P, Tichý L. Patterns of plant traits in annual vegetation of man-made habitats in central Europe. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2006, 8(2): 69–81.
- [28] Williams N S G, Morgan J W, McDonnell M J, McCarthy M A. Plant traits and local extinctions in natural grasslands along an urban-rural gradient. *Journal of Ecology*, 2005, 93(6): 1203–1213.
- [29] Wittig R. *Siedlungsvegetation*. Stuttgart: Ulmer, 2002.
- [30] Knapp S, Kühn I, Stolle J, Klotz S. Changes in the functional composition of a Central European urban flora over three centuries. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2010, 12(3): 235–244.
- [31] Marzluff J M, Marzluff J, Bowman R, Donnelly R. Worldwide urbanization and its effect on birds // Marzluff J M, Bowman R, Donnelly R, eds. *Avian Ecology and Conservation in An Urbanizing World*. New York: Kluwer Academic Publishers, 2001: 19–47.
- [32] Chace J F, Walsh J J. Urban effects on native avifauna: a review. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 74(1): 46–69.
- [33] Falk J H. Energetics of a suburban lawn ecosystem. *Ecology*, 1976, 57(1): 141–150.
- [34] Lim H C, Sodhi N S. Responses of avian guilds to urbanisation in a tropical city. *Landscape and Urban Planning*, 2004, 66(4): 199–215.
- [35] McKinney M L. Urbanization as a major cause of biotic homogenization. *Biological Conservation*, 2006, 127(3): 247–260.
- [36] Jokimäki J, Kaisanlahti-Jokimäki M L. Spatial similarity of urban bird communities: a multiscale approach. *Journal of Biogeography*, 2003, 30(8): 1183–1193.
- [37] Hope D, Gries C, Zhu W X, Fagan W F, Redman C L, Grimm N B, Nelson A L, Martin C, Kinzig A. Socioeconomics drive urban plant diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2003, 100(15): 8788–8792.
- [38] Wu J G, Jenerette G D, Buyantuyev A, Redman C L. Quantifying spatiotemporal patterns of urbanization: the case of the two fastest growing metropolitan regions in the United States. *Ecological Complexity*, 2011, 8(1): 1–8.
- [39] Walker J S, Grimm N B, Briggs J M, Gries C, Dugan L. Effects of urbanization on plant species diversity in central Arizona. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(9): 465–470.
- [40] Kinzig A P, Warren P, Martin C, Hope D, Katti M. The effects of human socioeconomic status and cultural characteristics on urban patterns of biodiversity. *Ecology and Society*, 2005, 10(1): 23.
- [41] McKinney M L. Correlated non-native species richness of birds, mammals, herptiles and plants: scale effects of area, human population and native plants. *Biological Invasions*, 2006, 8(3): 415–425.
- [42] Carreiro M M. Using the urban-rural gradient approach to determine the effects of land use on forests remnants // Carreiro M M, Song Y C, Wu J. *Ecology, Planning, and Management of Urban Forests*. New York: Springer, 2008.
- [43] Tait C J, Daniels C B, Hill R S. Changes in species assemblages within the Adelaide Metropolitan Area, Australia, 1836–2002. *Ecological Applications*, 2005, 15(1): 346–359.
- [44] Caspersen O H, Olafsson A S. Recreational mapping and planning for enlargement of the green structure in greater Copenhagen. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2010, 9(2): 101–112.
- [45] Fujita A, Maeto K, Kagawa Y, Ito N. Effects of forest fragmentation on species richness and composition of ground beetles (Coleoptera: Carabidae and Brachinidae) in urban landscapes. *Entomological Science*, 2008, 11(1): 39–48.
- [46] Carrete M, Tella J L, Blanco G, Bertellotti M. Effects of habitat degradation on the abundance, richness and diversity of raptors across Neotropical biomes. *Biological Conservation*, 2009, 142(10): 2002–2011.
- [47] Palmer G C, Fitzsimons J A, Antos M J, White J G. Determinants of native avian richness in suburban remnant vegetation: implications for conservation planning. *Biological Conservation*, 2008, 141(9): 2329–2341.
- [48] Muratet A, Machon N, Jiguet F, Moret J, Porcher E. The role of urban structures in the distribution of wasteland flora in the greater Paris area, France. *Ecosystems*, 2007, 10(4): 661–671.
- [49] Schmitt J L, Goetz M N B. Species richness of fern and lycophyte in an urban park in the Rio dos Sinos basin, Southern Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, 2010, 70(Suppl4): 1161–1167.
- [50] Gavareski C A. Relation of park size and vegetation to urban bird populations in Seattle, Washington. *The Condor*, 1976, 78(3): 375–382.

- [51] Smith R M ,Thompson K ,Hodgson J G ,Warren P H ,Gaston K J. Urban domestic gardens ( IX ) : composition and richness of the vascular plant flora ,and implications for native biodiversity. *Biological Conservation* ,2006 ,129( 3 ) : 312–322.
- [52] Fernández-Juricic E. Avifaunal use of wooded streets in an urban landscape. *Conservation Biology* ,2000 ,14( 2 ) : 513–521.
- [53] Angold P G ,Sadler J P ,Hill M O ,Pullin A ,Rushton S ,Austin K ,Small E ,Wood B ,Wadsworth R ,Sanderson R ,Thompson K. Biodiversity in urban habitat patches. *Science of The Total Environment* ,2006 ,360( 1/3 ) : 196–204.
- [54] Sattler T ,Borcard D ,Arletaz R ,Bontadina F ,Legendre P ,Obrist M K ,Moretti M. Spider ,bee ,and bird communities in cities are shaped by environmental control and high stochasticity. *Ecology* ,2010 ,91( 11 ) : 3343–3353.
- [55] Sattler T ,Duelli P ,Obrist M K ,Arletaz R ,Moretti M. Response of arthropod species richness and functional groups to urban habitat structure and management. *Landscape Ecology* ,2010 ,25( 6 ) : 941–954.
- [56] Cornelis J ,Hermly M. Biodiversity relationships in urban and suburban parks in Flanders. *Landscape and Urban Planning* ,2004 ,69( 4 ) : 385–401.
- [57] Murakami K ,Maenaka H ,Morimoto Y. Factors influencing species diversity of ferns and fern allies in fragmented forest patches in the Kyoto city area. *Landscape and Urban Planning* ,2004 ,70( 3/4 ) : 221–229.
- [58] Malcolm J R ,Liu C R ,Neilson R P ,Hansen L ,Hannah L. Global warming and extinctions of endemic species from biodiversity hotspots. *Conservation Biology* ,2006 ,20( 2 ) : 538–548.
- [59] Thomas C D ,Franco A M A ,Hill J K. Range retractions and extinction in the face of climate warming. *Trends in Ecology and Evolution* ,2006 ,21( 8 ) : 415–416.
- [60] Wilson R J ,Gutiérrez D ,Gutiérrez J ,Martínez D ,Agudo R ,Montserrat V J. Changes to the elevational limits and extent of species ranges associated with climate change. *Ecology Letters* ,2005 ,8( 11 ) : 1138–1146.
- [61] Franco A M A ,Hill J K ,Kitschke C ,Collingham Y C ,Roy D B ,Fox R ,Huntley B ,Thomas C D. Impacts of climate warming and habitat loss on extinctions at species’ low-latitude range boundaries. *Global Change Biology* ,2006 ,12( 8 ) : 1545–1553.
- [62] Parmesan C ,Walther G ,Burga C ,Edwards P. Detection of range shifts: general methodological issues and case studies of butterflies // “Fingerprints” of Climate Change–Adapted Behaviour and Shifting Species Ranges. The Netherlands: Kluwer Academic ,2001: 57–76.
- [63] Pounds J A ,Bustamante M R ,Coloma L A ,Consuegra J A ,Fogden M P L ,Foster P N ,La Marca E ,Masters K L ,Merino-Viteri A ,Puschendorf R ,Ron S R ,Sánchez-Azofeifa G A ,Still C J ,Young B E. Widespread amphibian extinctions from epidemic disease driven by global warming. *Nature* ,2006 ,439( 7073 ) : 161–167.
- [64] Harvell C D ,Mitchell C E ,Ward J R ,Altizer S ,Dobson A P ,Ostfeld R S ,Samuel M D. Climate warming and disease risks for terrestrial and marine biota. *Science* ,2002 ,296( 5576 ) : 2158–2162.
- [65] Nehring S. Establishment of thermophilic phytoplankton species in the North Sea: biological indicators of climatic changes? *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil* ,1998 ,55( 4 ) : 818–823.
- [66] Chisholm J R M ,Jaubert J M ,Giaccone G. *Caulerpa taxifolia* in the northwest Mediterranean: introduced species or migrant from the Red Sea? *Comptes Rendus de l’Académie des Sciences. Série 3 ,Sciences de la vie* ,1995 ,318( 12 ) : 1219–1226.
- [67] Nobis M P ,Jaeger J A G ,Zimmermann N E. Neophyte species richness at the landscape scale under urban sprawl and climate warming. *Diversity and Distributions* ,2009 ,15( 6 ) : 928–939.
- [68] German c ,Sattler T ,Obrist M ,Moretti M. Xero-thermophilous and grassland ubiquitous species dominate the weevil fauna of Swiss cities ( Coleoptera ,Curculionidae) CHRISTOPH GERMANNI ,THOMAS SATTLER2 ,3 ,MARTIN K. OBRIST4 &. 2008: 141–154.
- [69] Herbert S ,Hans-Peter B ,Wolfram K. The soil ,flora ,and vegetation of Berlin’s waste lands // Nicholson E M ,ed. *Nature in Cities: The Natural Environment in the Design and Development of Urban Green Space*. Chichester: Wiley ,1979: 115–132.
- [70] Knapp S ,Kühn I ,Bakker J P ,Kleyer M ,Klotz S ,Ozinga W A ,Poschlod P ,Thompson K ,Thuiller W ,Römermann C. How species traits and affinity to urban land use control large-scale species frequency. *Diversity and Distributions* ,2009 ,15( 3 ) : 533–546.
- [71] Zhang X Y ,Friedl M A ,Schaaf C B ,Strahler A H. Climate controls on vegetation phenological patterns in northern mid- and high latitudes inferred from MODIS data. *Global Change Biology* ,2004 ,10( 7 ) : 1133–1145.
- [72] Neil K L ,Landrum L ,Wu J G. Effects of urbanization on flowering phenology in the metropolitan phoenix region of USA: findings from herbarium records. *Journal of Arid Environments* ,2010 ,74( 4 ) : 440–444.
- [73] Sanderson K. Weed’s seeds evolve quickly in the city. *Nature News* ,2008 ,doi: 10. 1038/news. 2008. 639.
- [74] Pouyat R V ,Yesilonis I D ,Russell–Anelli J ,Neerchal N K. Soil chemical and physical properties that differentiate urban land-use and cover types. *Soil Science Society of America Journal* ,2007 ,71( 3 ) : 1010–1019.
- [75] Jim C Y. Soil characteristics and management in an urban park in Hong Kong. *Environmental Management* ,1998 ,22( 5 ) : 683–695.
- [76] Hamberg L ,Malmivaara-Lämsä M ,Lehvävirta S ,Kotze D J. The effects of soil fertility on the abundance of rowan ( *Sorbus aucuparia* L. ) in urban forests. *Plant Ecology* ,2009 ,204( 1 ) : 21–32.
- [77] Arteaga M A ,Delgado J D ,Otto R ,Fernández-Palacios J M ,Arévalo J R. How do alien plants distribute along roads on oceanic islands? A case study in Tenerife ,Canary Islands. *Biological Invasions* ,2009 ,11( 4 ) : 1071–1086.
- [78] Clergeau P ,Jokimäki J ,Savard J P L. Are urban bird communities influenced by the bird diversity of adjacent landscapes?. *Journal of Applied Ecology* ,2001 ,38( 5 ) : 1122–1134.

- [79] Hulme P E. Relative roles of life-form , land use and climate in recent dynamics of alien plant distributions in the British Isles. *Weed Research* , 2009 , 49( 1) : 19–28.
- [80] Tratalos J , Fuller R A , Warren P H , Davies R G , Gaston K J. Urban form , biodiversity potential and ecosystem services. *Landscape and Urban Planning* , 2007 , 83( 4) : 308–317.
- [81] López-Flores V , MacGregor-Fors I , Schondube J E. Artificial nest predation along a Neotropical urban gradient. *Landscape and Urban Planning* , 2009 , 92( 2) : 90–95.
- [82] Marini L , Fontana P , Scotton M , Klimek S. Vascular plant and Orthoptera diversity in relation to grassland management and landscape composition in the European Alps. *Journal of Applied Ecology* , 2008 , 45( 1) : 361–370.
- [83] Wu J G. Effects of changing scale on landscape pattern analysis: scaling relations. *Landscape Ecology* , 2004 , 19( 2) : 125–138.
- [84] Lü Y H , Fu B J. Ecological scale and scaling. *Acta Ecologica Sinica* , 2001 , 21( 12) : 2096–2105.
- [85] Biamonte E , Sandoval L , Chacoón E , Barrantes G. Effect of urbanization on the avifauna in a tropical metropolitan area. *Landscape Ecology* , 2011 , 26( 2) : 183–194.
- [86] Vuorisalo T , Lahtinen R , Laaksonen H. Urban biodiversity in local newspapers: a historical perspective. *Biodiversity and Conservation* , 2001 , 10( 10) : 1739–1756.
- [87] Pautasso M. Scale dependence of the correlation between human population presence and vertebrate and plant species richness. *Ecology Letters* , 2007 , 10( 1) : 16–24.
- [88] Knapp S , Kühn I , Stolle J , Klotz S. Changes in the functional composition of a Central European urban flora over three centuries. *Perspectives in Plant Ecology Evolution and Systematics* , 2010 , 12( 3) : 235–244.
- [89] Ward S. Genetic analysis of invasive plant populations at different spatial scales. *Biological Invasions* , 2006 , 8( 3) : 541–552.
- [90] Thompson K , Hodgson J G , Smith R M , Warren P H , Gaston K J. Urban domestic gardens ( III ) : composition and diversity of lawn floras. *Journal of Vegetation Science* , 2004 , 15( 3) : 373–378.
- [91] Schlesinger M D , Manley P N , Holyoak M. Distinguishing stressors acting on land bird communities in an urbanizing environment. *Ecology* , 2008 , 89( 8) : 2302–2314.
- [92] Magura T , Lövei G L , Tóthmérész B. Does urbanization decrease diversity in ground beetle ( Carabidae ) assemblages?. *Global Ecology and Biogeography* , 2010 , 19( 1) : 16–26.
- [93] Cam E , Nichols J D , Sauer J R , Hines J E , Flather C H. Relative species richness and community completeness: birds and urbanization in the Mid-Atlantic states. *Ecological Applications* , 2000 , 10( 4) : 1196–1210.
- [94] Savard J P L , Clergeau P , Mennechez G. Biodiversity concepts and urban ecosystems. *Landscape and Urban Planning* , 2000 , 48( 3/4) : 131–142.
- [95] Luck M , Wu J G. A gradient analysis of urban landscape pattern: a case study from the Phoenix metropolitan region , Arizona , USA. *Landscape Ecology* , 2002 , 17( 4) : 327–339.
- [96] Godefroid S , Koedam N. Urban plant species patterns are highly driven by density and function of built-up areas. *Landscape Ecology* , 2007 , 22( 8) : 1227–1239.
- [97] Huang D C , Su Z M , Zhang R Z , Koh L P. Degree of urbanization influences the persistence of *Dorytomus* weevils ( Coleoptera: Curculionidae ) in Beijing , China. *Landscape and Urban Planning* , 2010 , 96( 3) : 163–171.
- [98] Sandström U G , Angelstam P , Mikusiński G. Ecological diversity of birds in relation to the structure of urban green space. *Landscape and Urban Planning* , 2006 , 77( 1/2) : 39–53.
- [99] Andersson E , Ahmé K , Pyykönen M , Elmqvist T. Patterns and scale relations among urbanization measures in Stockholm , Sweden. *Landscape Ecology* , 2009 , 24( 10) : 1331–1339.
- [100] Wu J G. Urban sustainability: an inevitable goal of landscape research. *Landscape Ecology* , 2010 , 25( 1) : 1–4.
- [101] Wu J J. Making the case for landscape ecology: an effective approach to urban sustainability. *Landscape Journal* , 2008 , 27( 1) : 41–50.
- [102] Wu J G. Changing perspectives on biodiversity conservation: from species protection to regional sustainability. *Biodiversity Science* , 2008 , 16( 3) : 205–213.
- [103] Groves C R , Jensen D B , Valutis L L , Redford K H , Shaffer M L , Scott J M , Baumgartner J V , Higgins J V , Beck M W , Anderson M G. Planning for biodiversity conservation: putting conservation science into practice. *Bioscience* , 2002 , 52( 6) : 499–512.

#### 参考文献:

- [84] 吕一河,傅伯杰. 生态学中的尺度及尺度转换方法. *生态学报* , 2001 , 21( 12) : 2096–2105.