

DOI: 10.5846/stxb202111033092

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.

Wang X K, Zhao L, Ren Y F, Zhang H X, Su Z M, Sun X, Ouyang Z Y. Research progress of natural manipulative experiment in urban ecology. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(5): 1763-1774.

城市生态学自然模拟实验研究进展

王效科^{1,2,3,*}, 赵露^{1,2}, 任玉芬^{1,3}, 张红星^{1,3}, 苏芝敏^{1,3}, 孙旭^{1,3}, 欧阳志云^{1,2,3}

1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国科学院北京城市生态系统研究站, 北京 100085

摘要: 自然模拟实验, 通过适当控制影响因素研究自然状态下生态系统变化, 已经越来越受到生态学家的欢迎。新兴的快速发展的城市生态学越来越多的采用自然模拟实验方法。研究从城市生态学的实验设计方法(如人工梯度、自然梯度和城市建设实验)、环境因子(如空气污染、热岛、灯光和地表硬化)生态效应和生态系统(如社区、绿地、绿化屋顶和集水区)响应等方面, 分析了国内外大量城市生态学自然模拟实验的研究案例, 并总结了城市生态学自然模拟实验的特点, 指出了城市生态学模拟实验应该考虑的主要问题, 并提出未来主要发展方向: (1) 多种环境因子复合影响模拟实验研究, (2) 生态系统结构和功能响应模拟实验研究, (3) 近自然的长期模拟实验研究, (4) 大范围的联网模拟实验研究和(5) 面向城市生态恢复和建设的模拟实验研究。希望研究能够为推进我国城市生态学的实验研究起到抛砖引玉作用。

关键词: 自然模拟实验; 城市生态学; 实验设计方法; 城市环境因子; 城市生态系统

Research progress of natural manipulative experiment in urban ecology

WANG Xiaoke^{1,2,3,*}, ZHAO Lu^{1,2}, REN Yufen^{1,3}, ZHANG Hongxing^{1,3}, SU Zhimin^{1,3}, SUN Xu^{1,3}, OUYANG Zhiyun^{1,2,3}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Beijing Urban Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: The natural manipulative experiment, by controlling influencing factors appropriately to study changes in the ecosystem under natural conditions, has become more and more popular with ecologists. This article, which focused on the experimental design methods of urban ecology (such as artificial gradients, natural gradients and urban construction experiments), environmental factors (such as air pollution, heat islands, nightlight and surface hardening) and the response of urban ecosystems (such as communities, green spaces, green roofs and watersheds), reviewed a great number of cases using natural manipulative experiments in urban ecology at home and abroad. It also summarized the characteristics of the natural manipulative experiment of urban ecology, pointed out that the main problems which should be considered in the urban ecology manipulative experiment, and proposed the main development direction in the future: (1) Manipulative experiments on the compound impact of multiple environmental factors; (2) Manipulative experiments on the response of the ecosystem structure and function; (3) Long-term near-natural manipulative experiments; (4) Large-scale network of manipulative experiments; (5) Manipulative experiments on the urban ecological restoration and construction. We hope that

基金项目: 国家生态网络平台专题服务(能力建设)项目

收稿日期: 2021-11-03; **网络出版日期:** 2022-10-21

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

<http://www.ecologica.cn>

this review can play a role in advancing the experimental research of urban ecology in China.

Key Words: natural manipulative experiment; urban ecology; experimental design methodology; urban environmental factors; urban ecosystem

随着越来越多的人选择在城市生活,城市生态环境成为了全球关注的焦点,如空气污染、热岛效应、洪涝灾害、疾病扩散等。城市生态学,一门研究城市环境中生物及其与环境相互关系的科学,也随之得到蓬勃发展,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。城市生态学,一方面需要借助传统的生态学理论和方法,来认识和解决城市生态环境问题;另一方面,需要根据城市生态系统的一些特点,如空间异质性、人与自然耦合等^[1-2],发展完善新的城市生态学研究方法。模拟实验与观测研究和模型模拟共同构成了生态学研究的三种基本手段。一般来说,科学发现首先是来源于观测,然后在观测的基础上提出假设,通过模拟实验来验证假设,明确假设背后的机理机制,再基于验证过的假设构建模型,进行科学预测,指导人类社会实践^[3]。尽管在自然条件下,可以观测到许多生态学现象的出现,但这种现象可能要受到许多因素的影响,因此只有通过一定控制条件下的模拟实验,才可能验证观测到的生态学现象及其关键影响因素是否存在因果关系。模拟实验的优势在于采用严格的假设演绎方法,通过科学陈述和验证,将假设的机制与其他机制区分开来^[4]。模拟实验根据与自然状态的近似程度,分为实验室模拟实验和自然(野外)模拟实验。实验室模拟实验是指在实验室开展的小规模实验。由于其生物生长发育和活动受到了很大限制,并且与自然生境差异较大,其研究结果往往与自然界的生态学现象和过程有很大差异。自然模拟实验是指在自然(野外)条件下开展的模拟实验。由于其采用了真实的生态系统,减少因实验控制对非目标环境条件的改变,其结果更能够反映自然界实际状况下的生态学现象和过程。在城市生态学研究中,采用自然模拟实验方法,可以减少单独实验用地的需求,并能够包含城市真实的人类活动,更真实地反映城市环境变化对城市生物及其生态系统的影响。由于城市的一些环境变化(如气温升高、CO₂浓度升高、干旱加重等)类似于全球气候变化,因此城市已经被认为是研究全球气候变化的一个天然实验室^[5]。并且城市作为全球气候变化的天然实验室,具有一些优势,不仅可以反映多种环境因子变化(如增温、O₃和CO₂浓度升高、干旱等)对生态系统的影响,而且还可以研究环境变化对生态系统的长期大范围影响,如成熟林木的长期生态响应和适应研究、屋顶植物反映的植物对干旱的响应与适应^[6]。

从20世纪80年代以来,我国城市生态学一直处于繁荣发展时期,特别是在城市的植物调查、景观格局分析、生态评价和规划等取得了大量研究成果^[7],为我国城市规划和管理对策措施的制定提供了重要科学基础。在研究方法上,我国城市生态学主要采用了野外调查观测、遥感资料分析和生态规划评价等方法,探索城市生态系统的基本特征和主要影响因素。城市生态学的模拟实验工作,在我国开展的相对还比较少,只是零散的见于有关空气污染、硬化地表和灯光对城市植物的生态影响等相关研究领域。

近些年来,随着全球快速城市化和城市生态学研究的繁荣,生态学家不仅通过大量城市生态调查观测,辨识和发现了许多新的城市生态学现象和过程,而且越来越重视模拟实验工作,通过严格的模拟实验,科学证明了城市生态学现象和过程的形成原因^[8-9]。针对国内外很少能看到有关城市生态学自然模拟实验研究的相关系统综述,本文将结合国内外的城市生态学自然模拟实验案例,从实验设计方法、城市环境因子和生态系统类型等方面(图1),评述了城市生态学自然模拟实验的主要应用和发展趋势。

1 城市自然模拟生态学实验设计方法

生态学模拟实验就是通过控制影响因子或构建生态系统,模拟验证生物与环境间的因果关系,因此根据城市生态系统的特征(如空间异质性、高度人为管控等)^[2],可以按实验设计方法,将城市自然模拟实验分为:人工梯度实验、自然梯度实验和城市建设实验。

<http://www.ecologica.cn>

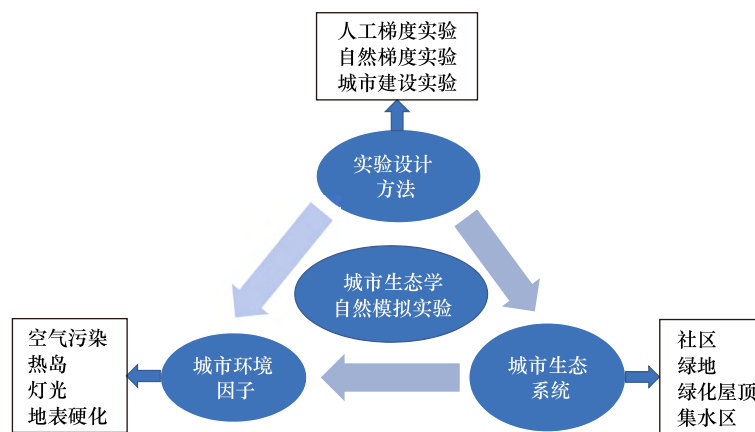


图 1 城市生态学自然模拟实验主要类型

Fig.1 The main type of natural manipulative experiments in urban ecology

(1) 人工梯度实验

生态学模拟实验中,人工设定环境因子梯度是一种最普遍的实验设计方法。例如将生态系统暴露在不同浓度的 O_3 和 CO_2 或不同温度条件下,分别研究空气污染^[10]、 CO_2 浓度升高^[11] 和增温^[12] 对植物及生态系统的影响。该方法的优点是环境因子暴露水平控制比较精确,实验重复设置容易、观测方便以及结果分析简单可靠,非常适合于建立环境因子与生态系统间的剂量响应关系和科学验证生物与环境间的因果关系。但由于在控制环境因子的过程中,可能对被研究的生态系统及其它生境因子产生较大影响,容易造成实验结果与实际情况存在一定的差异^[13]。再加上环境因子控制有时成本比较高,因而该类生态学模拟实验很难长期维持下去,不适于城市生态学的长期模拟实验。

(2) 自然梯度实验

城市作为高度空间异质性的生态系统,其内部及其与周边形成了许多环境梯度变化,如人口密度梯度、土地覆盖梯度(硬化地表比例梯度)、污染物梯度(氮沉降梯度、空气污染梯度)、热环境梯度(热岛效应)、植被类型梯度和土壤梯度等等。这些环境因子或生态系统的变化梯度,可以直接用在城市生态学模拟实验中。这既可以减少人工控制环境因子梯度的成本,而且减轻人工控制对生态系统及其它环境因子带来的不必要环境影响,使得模拟实验更接近于自然状态。对于大部分城市来说,城市发展在空间上表现为从城区向郊区不断向外扩张,形成了典型的城乡变化梯度。这种城乡梯度形成的社会经济和环境因子的变化梯度,为研究城市化对生态系统结构和功能的影响提供了一个天然实验条件^[14-15],也为研究环境变化(如全球增温、干旱、空气污染等)对生态系统的影响提供了一个天然实验条件^[5,16]。利用城乡梯度开展生态研究的案例很多。从研究方法上分为两类:一是选择距离城市中心不同距离的地方或样点,不对环境条件和生态系统做任何改变,直接调查观测所要研究的生态系统要素或过程,如土壤性质^[17-18]、生产力^[19]、生物群落^[20-22] 和温室气体排放等。二是选择距离城市中心不同距离的地方或样点,选择或改变某些环境条件或生态系统,调查观测生态系统要素或过程的变化,从而辨识城市化影响生态系统的关键因素。例如 Gregg 等就采用盆栽实验,去除土壤差异对生态系统的影响,可以清晰地辨识城乡气候和空气质量差异对生态系统的影响,证实了城乡臭氧梯度对林木生长具有显著影响^[23]。Gering 和 Blair 采用人工鸟巢,研究捕食者变化对城市鸟类类群和多样性的影响^[24]。Shochat 等在城乡不同地点,设置人工食物盘,研究鸟类的生境利用是如何受到捕食风险、机会成本、竞争和代谢成本的综合影响^[25]。采用人工改变环境条件的实验还有一个好处是增加实验重复数量,便于统计分析。生态系统的营养级是影响生物多样性的一个重要生态过程之一。Bang 通过美国凤凰城的城乡 9 个地点,采用裂区设计栽种当地植物沙漠毒菊,利用纱网遮盖防止鸟类采食植物,并设置高中低三个水分处理,研究城市化对鸟类-植物-节肢动物间营养级关系影响,发现城市改变了生物多样性的形成机制^[26]。Tabea 等

在瑞士5个城市及其周边农田,分别盆栽蚕豆,通过保护罩分别限制蚜虫和食蚜蝇入侵,研究城市化对生态系统营养级间相互作用的影响,发现城市化对生态系统营养级间相互作用的影响,具有从下到上的控制过程^[27]。

(3) 城市建设实验

城市生态学模拟实验,常常会受到城市空间、土地所有者和人类活动的限制。城市寸土寸金,任何用地建设都要符合严格的城市规划要求。土地所有者如果很难获得利益,还需要增加许多额外的工作和问题,就不愿为生态学模拟实验提供土地。城市人口聚集和人类活动频繁,也会对生态学模拟实验带来很多威胁。近些年来,人们越来越关心城市的自然景观及其生态功能,纷纷投入城市绿地的建设及城市植被和河道的恢复。生态学家可以通过和城市规划设计专家合作,将生态学实验纳入到城市绿地建设和生态恢复中^[28],即开展城市建设实验,也称融入城市设计的实验,将生态学实验和城市建设结合起来。这不但有助于提高对城市绿地生态系统的科学认识,而且直接指导城市建设项目^[29]。国内外的一些城市建设活动,如城市面源污染控制、城市棕地恢复、造林、河岸恢复和行道树种植等项目^[28,30],都试图将生态学模拟实验纳入其中,但符合模拟实验研究方法的对照、重复和独立严格要求的项目还很少。Felson等在美国最大城市纽约造林项目中,和项目设计者合作,开展了生态恢复案例研究^[29]。围绕城市林木存活和生长对城市环境胁迫(如污染、干旱、破坏等)、管理活动(如植物多样性增加和有机土改良等)和入侵物种的响应,建立了56个样地,按8种处理进行因子排列:树种丰富度(6种与3种植物)、林分复杂性(有灌草与无)和土壤改良(施粪肥与无)。该模拟实验将为生态学家设计和建立假设驱动的城市原位研究提供了一个平台,构建了能够获得人工生态系统过程相关的可重复的科学数据的新方法,建立了连接生态学家与业主(包括城市管理机构、工程队 and 用户等)的新框架,将成为城市设计者和公园维护者更新和扩展其生态知识的新工具。初步结果表明,土地整理和树种选择对城市土地的生态恢复效果具有很大影响^[31]。

2 城市环境因子生态效应自然模拟实验

对于生活在城市中的生物,其生境受到了城市发展的改变,包括空气污染、热岛效应、灯光效应、地表硬化等。为了确定这些生境变化对城市植物、动物和生态系统的实际影响程度,科学家采用了多种实验模拟方法,开展城市环境因子生态效应自然模拟实验。

(1) 空气污染生态效应实验

人们对城市空气污染的关注已经有近二百年的历史了。从早期的烟尘和SO₂污染,到现在的PM_{2.5}和O₃污染,不仅对人体健康造成很大危害,而且对植物和生态系统产生很大影响。大部分空气污染物(如O₃、SO₂、PAN、HF等)都能够进入叶片内部,在高浓度时可直接造成叶组织坏死,表现为叶面出现点、片伤斑,甚至植株个体死亡等急性伤害。在长期与低浓度污染物接触后,植物会受到慢性伤害,出现生长受阻、发育不良、失绿、早衰等现象,还会造成一些敏感物种的减少或消失^[32-33]。

空气污染对植物的影响通常采用熏气模拟实验,即将空气污染物浓度控制到特定水平,研究生物及生态系统对空气污染响应特征的模拟实验系统。熏气模拟实验装置可以分为箱式法和开放式法,前者可分为密闭箱式熏气实验和开顶式熏气室实验,后者为自由空气熏气实验。密闭箱式熏气实验是在人工控制的、污染物保持在特定的浓度、内部环境相对稳定的密闭气室内对实验材料(植物和动物)进行熏气研究。特点是设备较小、操作方便和实验结果准确。主要用于研究空气污染物浓度升高对植物和动物的生理生化或分子生物学特征的影响。但由于气室内环境和自然环境差别较大,多用于短期、高浓度空气污染物暴露下的生物学响应机理方面的研究。开顶式熏气室实验是通过保持与外部进行气体交换的顶部开放的熏气室内对实验材料(植物和动物)进行熏气研究。由于其经济易建,浓度控制比较稳定可靠,气室内环境比较接近自然状况,结果相对可靠,可以在近自然条件下研究多个梯度下空气污染物对植物的较长期影响。采用开顶式熏气装置,Zhang等^[34]和Li等^[10]分别研究了O₃污染对我国亚热带和暖温带的城市绿化树木的影响;杨宁等研究了O₃

污染对城市花卉叶片的伤害特征^[35]。该装置存在的最大问题是气室效应,包括:气室内温度升高、光照变弱;限制了昆虫进入气室,可能影响植物授粉;气室通风加速了空气流动引起植物干燥等。自由空气熏气实验是为了避免箱式法的气室效应对植物生长的影响,20 世纪末发展了开放式空气浓度升高(FACE)装置。空气在 FACE 系统内外可以自由流通,系统内外部的通风、光照、降水、温湿度、授粉等条件没有改变,理论上对植物大小和生长都有限制,能够代表植物及生态系统在自然条件下对空气污染物浓度升高的响应状况,实验结果可靠,但 FACE 研究对仪器设备要求高,费用昂贵,因此限制了该系统的使用。缺点还包括熏气范围内的污染物浓度具有不均匀梯度。大部分 FACE 装置是用于研究二氧化碳对生态系统的影响,研究空气污染(如臭氧)对生态系统的影响研究案例不多,如美国学者开展的 O₃ 污染对大豆^[13] 和山杨树^[36] 的影响及德国学者开展的 O₃ 污染对山毛榉林的影响^[37]。

(2) 热岛生态效应实验

城市化改变了地表热量平衡和近地表空气流动状态,使得城市的空气温度要比郊区高 2—5℃,即城市热岛效应^[38]。城市热岛效应引起的温度升高对生物的影响,已经成为城市生态学的一个重要研究内容。通过地面观测和遥感观测,不但探测到了城市气温和地表温度要比郊区高的热岛效应现象^[39—40],而且发现了热岛效应能够造成植物物候提前和生长加速。例如 Mimet 等在法国的雷恩市(Rennes)观测到二球悬铃木(*Platanus acerifolia*)和欧洲酸樱桃(*Prunus cerasus*)的花期提前^[41]。Melaas 等通过分析 Landsat 遥感数据,发现美国波士顿城区的地表温度比郊区要高出 7 度,生长期也延长了 18—22 天^[42]。自然状况下,城市内部局地土地覆盖和微气象条件造成的气温分布不均,可以作为环境梯度,开展城市增温对植物和生态系统的自然模拟实验^[43]。Meineke 等在美国北卡罗莱纳州的瑞丽(Raleigh),基于遥感热红外影像资料,选择城市内部的热点和凉点地方生长的栎树,研究了树木胸径生长和害虫丰度对热环境变化的响应,并发现增温会造成林木碳贮量的减少^[44]。但由于自然状况下,影响城市植物的因素比较多,除热岛效应增温外,土壤养分水分和人工管理(如灌溉、施肥)等因素都可能影响植物生长和生态系统响应。因此,可以在不同地点采用相同的土壤和植物,或盆栽办法,结合同样的管理措施,以增加研究模拟实验结果的可信度^[23,45]。

(3) 灯光生态效应实验

各种各样的灯光照明改变了城市光环境,打破了自然界的光环境昼夜更替。夜晚不再是漆黑一片,人们可以从事丰富多彩的活动,昼行动物可以继续活动。灯光不仅对自然界许多生物的生存和发育产生了影响^[46—47],而且会影响到动物行为、群落动态及生态系统功能^[48]。城市一般灯光的能量太小,虽然不能满足植物光合作用的需要,但可以满足一些藻类和浮游植物的光合作用需要^[49]。Bennie 等建立了人工模拟实验,研究不同灯光类型和光照时长对半自然草地的影响,发现灯光造成优势植物生物量和盖度的变化,并使得花期提前 4 天和延后 12 天^[47,49]。夜间灯光可能不利于生物的自然损伤修复,Futsaether 等通过室内模拟实验发现灯光下植物对臭氧危害更加敏感^[50]。由于许多昆虫具有向光性,灯光将吸引食草昆虫,造成生活在灯光下的植物受到更多伤害。再加上植物和昆虫的物候对灯光的响应不同,从而影响了植物的授粉和种子扩散等^[49]。鸟类是环境敏感生物,对灯光反映也比较敏感。Grunst 等通过模拟实验,移去山雀羽毛,发现晚间灯光照射巢穴后,能够引起山雀血液皮质酮浓度升高^[51]。近来,也有研究者通过全因子实验关注光照和噪音对山雀的影响,发现两者的影响在白天具有抵抗效应,晚间则具有协同效应。并且来源于城市和郊区的山雀对光照和噪音的响应具有明显差异^[52]。

(4) 地表硬化生态效应实验

城市发展过程中,硬化地表逐渐替代了自然植被或水体景观,改变了城市下垫面的性质^[53—54],导致植物生长面临了巨大的环境胁迫^[55—58]。国内外研究硬化地表对植物生长影响的自然模拟实验研究,主要包括原位观测实验、盆栽模拟实验和原位模拟实验。原位观测实验是利用城市已有的不同硬化地表类型,观测其对植物生长的影响差异。通过原位观测实验,宋英石等比较了不透水硬化地表与不完全硬化地表和无硬化地表上生长的银杏叶片光合作用差异,发现前者显著低于后两者^[58]。Volder 等比较研究了透水地表、不透水地表

和无硬化地表(对照)上枫香树(*Liquidamber styraciflua*, 15—18年树龄)的生长状况,没有发现显著性差异^[59]。原位观测理论上能全面真实地反映城市地表硬化对植物生理生化指标的综合影响^[59—62],但由于各观测点的植物来源、实验环境、人为因素及土壤本底值存在较大的不确定性,很难保证实验条件的一致性。盆栽模拟实验是通过植物盆栽,控制实验所需要的土壤来源和土壤环境条件、气候条件、树木生长本底值,保证土壤来源和植物管理的一致性,较好地避免了一些干扰因素的影响。Wang等采用盆栽模拟实验,发现硬化地表对白蜡和银杏幼树的影响,在水分供应充足时很小,只有到水分亏缺时才比较显著^[63]。盆栽模拟实验的不足之处是,由于受到盆体大小的限制,盆栽植物与原位生长的植物在能量平衡、根冠比、结构和碳分配格局等方面区别很大^[64],并不一定能够全面、真实地反映城市环境下原位生长的植物对城市环境变化的响应规律,且无法对植物生长进行长期和累积效应的研究。原位模拟实验,是通过建立较大面积的人工硬化地表试验场,直接种植树木,通过长期监测硬化地表形成的微环境和植物生长变化过程,探讨硬化地表通过微环境改变对植物生长发育和水分利用的影响机理,揭示植物对城市环境变化的生态响应和适应机制,能更全面地反映城市硬化地表对植物的生境和生长代谢过程产生的影响^[65]。通过原位模拟实验,Chen等发现地表硬化能够造成植物春季发芽提前和生长受阻等现象^[66];Cui等发现,与非硬化地表比较,不透水硬化地表下,油松、白蜡和元宝枫3种树木的生长和生物量都出现明显下降,而透水地表下,只有元宝枫的生物量出现明显下降^[67]。Montague和Kjelgren将原位观测实验和原位模拟实验相结合,比较研究了6种不同地面类型(沥青、混凝土、砾石、火山岩、松皮、草皮)下的植物生长状况,发现不透水硬化地表(沥青)下最差^[68]。

3 城市生态系统响应自然模拟实验

城市生产生活中,建立和形成了一些新型的生态系统单元,如社区、绿地、屋顶绿化、径流小区。这些生态系统单元对人类活动如何响应和对环境(如水体、土壤等)有什么影响,是需要通过模拟实验来验证的。

(1) 城市社区实验

为人类提供居住环境的城市社区,不仅仅承载着各种建筑物和人,而且居住着许多生物,包括构成绿地的树木、灌木和草本植物、各种依赖植物生存的昆虫和无脊椎动物、爬行动物、鸟类、啮齿动物等。这些植物和动物能够为人类提供多种生态系统服务,直接影响着居民的健康和日常生活。英国的城市花园生物多样性研究项目^[69],在谢菲尔德(Sheffield)市选择了60多个家庭花园,调查了维管束植物^[70]、隐花植物^[71]、无脊椎动物^[72]和鸟类^[73]等,分析了家庭花园的生物多样性特征、主要自然和人为影响因素。该研究还采用人工巢穴和水塘,研究了蜜蜂、黄蜂、水生生物和腐食生物等生物多样性,评价了人工措施提升庭院生物多样性的效果^[74]。美国凤凰城长期生态系统研究计划选择了四个居民区,每个包括6户居民,分别对应中性生境、绿洲生境、干旱生境和自然生境类型^[75],研究了庭院景观类型和管理措施对生产力、林冠微气候^[76]、土壤养分库及通量、昆虫丰度和多样性的影响^[77],分析了人类认识和行为对景观与人类之间关系的影响^[78]。

(2) 城市绿地实验

由于城市绿地具有降温、改善空气质量、减少暴雨径流和固碳等生态系统服务功能,城市绿地被称为绿色基础设施或生态基础设施^[79—81]。传统城市规划和建设,绿地建设主要考虑的是成本、耐用、易维护、安全和美观。现在的城市绿地建设,更加关注绿地的生态系统结构、功能和服务。通过模拟实验,研究各种环境条件和管理措施对城市绿地生物多样性和生态系统功能的影响,将能够为城市绿地规划建设管理提供重要科学依据。Fini等对枫树(*Acer pseudoplatanus* L.)幼苗采用3种不同方式的顶端修剪,研究修剪对林木生理和生长的影响^[82]。Norton等在英国南部城市贝德福德(Bedford)、卢顿(Luton)和克兰菲尔德(Granfield)建立了实验样地,设置高中低3类植物多样性和高中低3个植物高度处理,研究生物多样性和绿地管理对植物组成、无脊椎动物和土壤碳氮及微生物的影响^[83]。还有学者通过模拟实验,研究了城市草坪管理强度对昆虫多样性和生态系统碳循环的影响^[84—86]。

(3) 屋顶绿化评价实验

城市屋面绿化可以为城市提供许多生态系统服务,如建筑热环境调节、热岛效应减缓、暴雨径流减少,空气和水质量改善、碳固定等作用^[87]。科学家们通过自然模拟实验,为确定适宜的植物种类、土壤材料和土壤厚度提供科学依据。例如,Aloisio 等在纽约 10 个楼顶建立培养箱研究不同来源植物的存活率和盖度,发现主要决定因素是构建绿色屋顶的植物组成和微气候条件^[88]。Dusza 等通过盆栽实验,研究了 20 种植物、2 种土层厚度和 2 种土壤材料对植物生物量、叶片蒸腾、土壤持水能力及有机碳氮淋湿量的影响,发现土层厚度和土壤材料对屋面生态系统的功能有很大影响^[89]。Berndtsson 等研究了日本福冈和瑞典的绿色屋顶暴雨径流水质特点,发现两地的绿色屋顶均为污染物质的释放源,尤其是溶解性营养盐的释放^[90];Berndtsson 等在瑞典马尔默和隆德的研究表明,绿色屋顶是硝酸盐、总磷和磷酸盐的释放源,建成时间短的绿色屋顶更容易成为总氮的释放源^[91]。Zhang 等在重庆建立了小型屋面模拟径流场,研究了实际降雨下,不同屋面材料对径流水质的影响^[92]。类似的实验在澳大利亚^[93]、英国^[94]和美国^[95]也有报道。

(4) 集水区水文水质效应实验

城市面临的严重洪涝灾害和面源污染与水循环过程密切相关。城市地表变化,包括地表构成元素(道路、广场和绿地等)及其空间布局变化,改变了城市水文过程和水体污染物排放特征,是城市洪涝灾害和面源污染形成的主要原因^[96]。降雨径流在地表产生汇流形成的集水区,可以作为降雨径流研究的基本实验单元,用来探讨各种因素或措施对城市径流的影响^[97]。城市水文水质效应模拟实验最常见的集水区为道路积集水区和地面汇水集水区。Gilbert 和 Clausen 在美国康涅狄格(Connecticut)州三种不同路面材料(沥青铺砌、碎石铺砌、水泥铺砌)的道路集水区,观测降雨径流过程,发现沥青铺砌路面径流的径流系数最高,且其径流污染物浓度(SS、N、P 和重金属 Pb、Zn、Cu)明显高于碎石铺砌和水泥铺砌道路径流^[98]。Chebbo 和 Gromaire 在法国巴黎市区一个 42 公顷区域,包括多个小型商店、办公和工业活动的场所,在多个屋面和地面汇流集水区出口等安装流量测定设备,采集降雨径流,分析评价城市降雨径流污染物浓度变化和负荷^[99]。Hou 等在陕西省西咸新区建立了一个人工降水实验平台,模拟多种低影响发展措施(如透水地表和蓄水塘)对地表径流过程的影响,同时考虑了坡度和降雨强度变化的影响^[100]。

4 研究展望

以上分析可以看出,国内外城市自然模拟实验的研究内容和方法非常多样。研究内容涵盖了城市生态系统的主要影响因子(如空气污染、热岛效应、灯光、地表硬化等)、主要生物类群(如植物、动物和微生物等)和主要生态过程(如水、碳、氮循环)等。研究方法有些对自然环境改变比较大(如密闭箱室熏气法),而另一些则对自然环境改变小(如自由大气熏气法);有些使用人工构建的生态系统(如盆栽实验),而另一些则使用实际生态系统(如原位实验)。由于城市生态系统的复杂多样性及其全球研究的广泛性,本文很难覆盖城市生态学实验方法的所有内容,只期望达到抛砖引玉作用,将目前国内外城市生态学自然实验的主要研究内容和常见研究方法罗列出来,并进行一些初步分析评价,供我国城市生态学者借鉴。

在开展城市生态学自然模拟实验时,除按需要考虑城市生态系统的影响因素多、结构复杂、过程多样以及空间异质性和多尺度性外,还需要考虑:(1)实验限制因素多而复杂,如地价、规划和业主对实验用地的限制以及人为干扰对实验的破坏;(2)不能简单排除人类活动。城市作为一种以人为主导的社会经济自然复合生态系统^[101]。开展以城市生态系统为对象的模拟实验,无论是以公园、社区或集水区为研究单元,还是以植物、动物或生态系统过程为研究对象,都不能排除和限制人类正常生产生活活动。因此,在城市生态学模拟实验的处理水平确定、装置构建、实验单元布置以及观测方法和数据处理方法选择时,应该全面把握真实性、复杂性、可操作性等之间的权衡^[102]。

近些年来,围绕着气候变化、生物多样性和可持续发展等全球问题,生态学家采用一些高技术手段^[103],建立了许多大规模、综合性和近自然的生态学模拟实验^[104],如自由 CO₂ 气体施肥实验(Free-Air CO₂

Enrichment, FACE)^[105]、生物多样性-生态系统功能实验(Biodiversity-EcosystemFunction, BEF)^[106]、生态箱(Ecotron)^[107]国际干旱研究网络(Drought-Net)^[108]、营养网络(Nutrient Network, NutNet)^[109]等,对城市生态学研究具有重要借鉴作用。就此,结合城市生态学的研究方向,建议近期城市生态学的自然模拟实验重点要考虑以下方向:

(1)多种环境因子复合影响模拟实验研究:无论生活在城市的各种生物还是其相关生态系统,都要受到多种环境因子的影响,如CO₂和O₃浓度升高、热胁迫、干旱和人为管理等。传统的单个环境因子影响模拟实验就不足以回答多种环境因子的复合影响。因此,应该积极构建多因子对生态系统服务影响实验设施。

(2)生态系统结构和功能响应模拟实验研究:生态系统是由多种生物和环境构成的功能单元。研究城市环境中的生物间关系(如植物-昆虫间、植物-昆虫-鸟类或啮齿动物间等)及人与自然耦合的碳氮循环过程,对认识城市生物多样性和生态系统服务的形成机制至关重要。因此,应该逐步开展面向城市多物种结构和生态系统碳氮过程的生态学实验。

(3)近自然的长期模拟实验研究:严格控制的短期模拟实验对探索和辨识环境因子对生物及其生态系统的影响机制非常重要,但其往往难以再现真实的城市生态系统和满足城市规划管理的需要,因此,建立尽可能接近真实城市环境的模拟实验设施,研究城市生态系统的长期响应过程,应该得到高度重视。

(4)大范围的联网模拟实验研究:由于不同城市的地理背景、规模、历史、经济基础等千差万别,基于个别城市的单点模拟实验研究成果,就很难进行外推和构建一般性规律。因此,联合多个城市的同类型模拟实验,采用尽可能一致的实验方法及其规范,建立大范围的生态学模拟实验网络将是城市生态学研究的一种重要手段。

(5)面向城市生态恢复和建设的模拟实验研究:近年来,国际社会提出了推广基于自然解决方案的生态保护和恢复方法^[110],以积极预防城市生态环境胁迫和应对全球气候变化。国内外许多城市都在积极开展各种城市废弃地恢复利用、城市绿地和河岸恢复、城市面源污染治理等工程建设,为城市生态学提出了新的科学问题和实践需求。如果能够利用这一重要机遇,生态学家积极与城市规划管理部门联合,将生态学模拟实验纳入城市规划管理,一定能够达到事半功倍的双赢。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Jiang L, Jiang J, Liang J, Wilcox K, Collins S, Knapp A, Pockman W, Smith M. Frontiers of Ecosystem Modeling and Large-Scale Experiments: Challenges and Opportunities, 2017. 137-162.
- [4] Hewitt J E, Thrush S F, Dayton P K, Bonsdorff E. The effect of spatial and temporal heterogeneity on the design and analysis of empirical studies of scale-dependent systems. The American Naturalist, 2007, 169(3): 398-408.
- [5] Lahr E C, Dunn R R, Frank S D. Getting ahead of the curve: cities as surrogates for global change. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2018, 285(1882): 20180643.
- [6] Farrell C, Szota C, Arndt S K. Urban plantings: 'living laboratories' for climate change response. Trends in Plant Science, 2015, 20(10): 597-599.
- [7] 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.
- [8] McPhearson T, Pickett S T A, Grimm N B, Niemelä J, Alberti M, Elmqvist T, Weber C, Haase D, Breuste J, Qureshi S. Advancing urban ecology toward a science of cities. BioScience, 2016, 66(3): 198-212.
- [9] Kay A D, Scherber E, Gaitan H, Lovelee A. Transitional Ecology: embedding ecological experiments into temporary urban public art. Journal of Urban Ecology, 2019, 5(1): juz020.
- [10] Li L, Wang X K, Niu J F, Cui J, Zhang Q Q, Wan W X, Liu B J. Effects of elevated atmospheric O₃ concentrations on early and late leaf growth and elemental contents of *Acer truncatum* Bung under mild drought. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(1): 31-34.
- [11] 毛子军, 赵溪竹, 刘林馨, 姜海凤. 3种落叶松幼苗对CO₂升高的光合生理响应. 生态学报, 2010, 30(2): 317-323.

- [12] 李旭, 谭钠丹, 吴婷, 程严, 刘世忠, 傅松玲, 李义勇, 刘菊秀. 增温对南亚热带常绿阔叶林 4 种幼树生长和碳氮磷化学计量特征的影响. *生态学报*, 2021, 41(15): 6146-6158.
- [13] Long S P, Ainsworth E A, Leakey A D B, Morgan P B. Global food insecurity. Treatment of major food crops with elevated carbon dioxide or ozone under large-scale fully open-air conditions suggests recent models may have overestimated future yields. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2005, 360(1463): 2011-2020.
- [14] Bettez N D, Groffman P M. Nitrogen deposition in and near an urban ecosystem. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(11): 6047-6051.
- [15] McDonnell M, Pickett S, Likens G, Cronon W. *Humans as components of ecosystems: the ecology of subtle human effects and populated areas*. Springer-Verlag, 1993
- [16] Calfapietra C, Peñuelas J, Niinemets Ü. Urban plant physiology: adaptation-mitigation strategies under permanent stress. *Trends in Plant Science*, 2015, 20(2): 72-75.
- [17] Fang S B, Pang H H, Dai X Y. Soil nitrogen and phosphorous dynamics by in situ soil experiments along an urban-rural gradient in Shanghai, China. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2019, 26(30): 31026-31037.
- [18] Fang Y T, Yoh M, Koba K, Zhu W X, Takebayashi Y, Xiao Y H, Lei C Y, Mo J M, Zhang W, Lu X K. Nitrogen deposition and forest nitrogen cycling along an urban-rural transect in Southern China. *Global Change Biology*, 2011, 17(2): 872-885.
- [19] Ziska L H, Bunce J A, Goins E W. Characterization of an urban-rural CO₂/temperature gradient and associated changes in initial plant productivity during secondary succession. *Oecologia*, 2004, 139(3): 454-458.
- [20] Blair R B. Land use and avian species diversity along an urban gradient. *Ecological Applications*, 1996, 6(2): 506-519.
- [21] Wang X M, Wang X K, Su Y B, Zhang H X. Land pavement depresses photosynthesis in urban trees especially under drought stress. *Science of the Total Environment*, 2019, 653: 120-130.
- [22] Wang X M, Wang X K, Chen Y Y, Berlyn G P. Photosynthetic parameters of urban greening trees growing on paved land. *IForest-Biogeosciences and Forestry*, 2019, 12(4): 403-410.
- [23] Gregg J W, Jones C G, Dawson T E. Urbanization effects on tree growth in the vicinity of New York City. *Nature*, 2003, 424(6945): 183-187.
- [24] Gering J C, Blair R B. Predation on artificial bird nests along an urban gradient: predatory risk or relaxation in urban environments? *Ecography*, 1999, 22(5): 532-541.
- [25] Shochat E, Lerman S B, Katti M, Lewis D B. Linking optimal foraging behavior to bird community structure in an urban-desert landscape: field experiments with artificial food patches. *The American Naturalist*, 2004, 164(2): 232-243.
- [26] Bang C, Faeth S H, Sabo J L. Control of arthropod abundance, richness, and composition in a heterogeneous desert city. *Ecological Monographs*, 2012, 82(1): 85-100.
- [27] Tabea T, Dirk S, Eva K. Effects of urbanization on direct and indirect interactions in a tri-trophic system. *Ecological Applications: a Publication of the Ecological Society of America*, 2016, 26(3): 664-675.
- [28] Felson A J, Pickett S T. Designed experiments: new approaches to studying urban ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2005, 3(10): 549-556.
- [29] Felson A J, Oldfield E E, Bradford M A. Involving ecologists in shaping large-scale green infrastructure projects. *BioScience*, 2013, 63(11): 882-890.
- [30] Felson A J, Bradford M A, Terway T M. Promoting Earth Stewardship through urban design experiments. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2013, 11(7): 362-367.
- [31] Ward E B, Doroski D A, Felson A J, Hallett R A, Oldfield E E, Kuebbing S E, Bradford M A. Positive long-term impacts of restoration on soils in an experimental urban forest. *Ecological Applications*, 2021, 31(5): e02336.
- [32] Emberson L. Effects of ozone on agriculture, forests and grasslands. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2020, 378(2183): 20190327.
- [33] Grulke N E, Heath R L. Ozone effects on plants in natural ecosystems. *Plant Biology*, 2019, 22: 12-37.
- [34] Zhang W W, Feng Z Z, Wang X K, Niu J F. Responses of native broadleaved woody species to elevated ozone in subtropical China. *Environmental Pollution*, 2012, 163: 149-157.
- [35] 杨宁, 王效科, 张玉龙, 郑飞翔, 陈媛媛. 不同植物叶片臭氧伤害症状及其生理响应机制的差异. *生态毒理学报*, 2017, 12(6): 141-149.
- [36] Karnosky D F, Zak D R, Pregitzer K S, Awmack C S, Bockheim J G, Dickson R E, Hendrey G R, Host G E, King J S, Kopper B J, Kruger E L, Kubiske M E, Lindroth R L, Mattson W J, McDonald E P, Noormets A, Oksanen E, Parsons W F J, Percy K E, Podila G K, Riemenschneider D E, Sharma P, Thakur R, Sôber A, Sôber J, Jones W S, Anttonen S, Vapaavuori E, Mankovska B, Heilman W, Isebrands J G. Tropospheric O₃ moderates responses of temperate hardwood forests to elevated CO₂: a synthesis of molecular to ecosystem results from the Aspen

- FACE project. *Functional Ecology*, 2003, 17(3): 289-304.
- [37] Pretzsch H, Dieler J, Matyssek R, Wipfler P. Tree and stand growth of mature Norway spruce and European beech under long-term ozone fumigation. *Environmental Pollution*, 2010, 158(4): 1061-1070.
- [38] Oke T R, Maxwell G B. Urban heat island dynamics in Montreal and Vancouver. *Atmospheric Environment*, 1975, 9(2): 191-200.
- [39] Peng S S, Piao S L, Ciais P, Friedlingstein P, Ottle C, Bréon F M, Nan H J, Zhou L M, Myneni R B. Surface urban heat island across 419 global big cities. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(2): 696-703.
- [40] Bounoua L, Zhang P, Mostovoy G, Thome K, Masek J, Imhoff M, Shepherd M, Quattrochi D, Santanello J, Silva J, Wolfe R, Toure A M. Impact of urbanization on US surface climate. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(8): 084010.
- [41] Mimet A, Pellissier V, Quénot H, Aguejard R, Dubreuil V, Rozé F. Urbanisation induces early flowering: evidence from *Platanus acerifolia* and *Prunus cerasus*. *International Journal of Biometeorology*, 2009, 53(3): 287-298.
- [42] Melaas E K, Sulla-Menashe D, Gray J M, Black T A, Morin T H, Richardson A D, Friedl M A. Multisite analysis of land surface phenology in North American temperate and boreal deciduous forests from Landsat. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 186: 452-464.
- [43] Zipper S C, Schatz J, Singh A, Kucharik C J, Townsend P A, Loheide S P II. Urban heat island impacts on plant phenology: intra-urban variability and response to land cover. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(5): 054023.
- [44] Meineke E, Youngsteadt E, Dunn R R, Frank S D. Urban warming reduces aboveground carbon storage. *Proceedings Biological Sciences*, 2016, 283(1840): 20161574.
- [45] Neil K, Wu J G, Bang C, Faeth S. Urbanization affects plant flowering phenology and pollinator community: effects of water availability and land cover. *Ecological Processes*, 2014, 3(1): 1-12.
- [46] Manville A M. Ecological consequences of artificial night lighting. *The Condor*, 2007, 109(1): 226-227.
- [47] Bennie J, Davies T W, Cruse D, Bell F, Gaston K J. Artificial light at night alters grassland vegetation species composition and phenology. *Journal of Applied Ecology*, 2018, 55(1): 442-450.
- [48] Longcore T, Rich C. Ecological light pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2004, 2(4): 191-198.
- [49] Bennie J, Davies T W, Cruse D, Gaston K J. Ecological effects of artificial light at night on wild plants. *Journal of Ecology*, 2016, 104(3): 611-620.
- [50] Futsaether C M, Vollsnes A V, Kruse O M O, Otterholt E, Kvaal K, Eriksen A B. Effects of the Nordic photoperiod on ozone sensitivity and repair in different clover species studied using infrared imaging. *Ambio*, 2009, 38(8): 437-442.
- [51] Grunst M L, Raap T, Grunst A S, Pinxten R, Parenteau C, Angelier F, Eens M. Early-life exposure to artificial light at night elevates physiological stress in free-living songbirds. *Environmental Pollution*, 2020, 259: 113895.
- [52] Dominoni D, Smit J A H, Visser M E, Halfwerk W. Multisensory pollution: artificial light at night and anthropogenic noise have interactive effects on activity patterns of great tits (*Parus major*). *Environmental Pollution: Barking, Essex: 1987*, 2020, 256: 113314.
- [53] 赵丹. 城市地表硬化的复合生态效应及生态化改造方法. *中国人口·资源与环境*, 2016, 26(S1): 213-217.
- [54] 高峻, 宋永昌. 基于遥感和 GIS 的城乡交错带景观演变研究——以上海西南地区为例. *生态学报*, 2003, 23(4): 805-813.
- [55] Grabosky J, Bassuk N, Irwin L, van Es H. Shoot and root growth of three tree species in sidewalks. *Journal of Environmental Horticulture*, 2001, 19(4): 206-211.
- [56] Bühler O, Kristoffersen P, Larsen S. Growth of street trees in Copenhagen with emphasis on the effect of different establishment concepts. *Arboriculture & Urban Forestry*, 2007, 33(5): 330-337.
- [57] Volder A, Viswanathan B, Watson W T. Pervious and impervious pavement reduce production and decrease lifespan of fine roots of mature Sweetgum trees. *Urban Ecosystems*, 2014, 17(2): 445-453.
- [58] Kjelgren R, Montague T. Urban tree transpiration over turf and asphalt surfaces. *Atmospheric Environment*, 1998, 32(1): 35-41.
- [59] Volder A, Watson T, Viswanathan B. Potential use of pervious concrete for maintaining existing mature trees during and after urban development. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2009, 8(4): 249-256.
- [60] Morgenroth J, Visser R. Aboveground growth response of *Platanus orientalis* to porous pavements. *Arboriculture & Urban Forestry*, 2011, 37(1): 1-5.
- [61] Mullaney J, Luecke T, Trueman S J. A review of benefits and challenges in growing street trees in paved urban environments. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 134: 157-166.
- [62] 宋英石, 李锋, 王效科, 付芝红, 赵丹. 城市地表硬化对银杏生境及生理生态特征的影响. *生态学报*, 2014, 34(8): 2164-2171.
- [63] Wang X M, Wang X K, Sun X, Berlyn G P, Rehim A. Effect of pavement and water deficit on biomass allocation and whole-tree transpiration in two contrasting urban tree species. *Urban Ecosystems*, 2020, 23(4): 893-904.
- [64] McLaughlin S B, Nosal M, Wullschlegel S D, Sun G. Interactive effects of ozone and climate on tree growth and water use in a southern

- Appalachian forest in the USA. *The New Phytologist*, 2007, 174(1): 109-124.
- [65] 陈媛媛, 江波, 王效科, 李丽. 北京典型绿化树种幼苗光合特性对硬化地表的响应. *生态学报*, 2017, 37(11): 3673-3682.
- [66] Chen Y Y, Wang X K, Jiang B, Li L. The leaf phenophase of deciduous species altered by land pavements. *International Journal of Biometeorology*, 2018, 62(6): 949-959.
- [67] Cui B W, Wang X M, Su Y B, Chen Y Y, Yu W W, Gong C, Li L, Rehim A, Wang X K. Impacts of pavement on the growth and biomass of young pine, ash and maple trees. *Trees*, 2021, 35(6): 2019-2029.
- [68] Montague T, Kjelgren R. Energy balance of six common landscape surfaces and the influence of surface properties on gas exchange of four containerized tree species. *Scientia Horticulturae*, 2004, 100(1/2/3/4): 229-249.
- [69] Thompson K, Austin K C, Smith R M, Warren P H, Angold P G, Gaston K J. Urban domestic gardens (I): putting small-scale plant diversity in context. *Journal of Vegetation Science*, 2003, 14(1): 71-78.
- [70] 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.
- [71] Smith R M, Thompson K, Warren P H, Gaston K J. Urban domestic gardens (XIII): composition of the bryophyte and lichen floras, and determinants of species richness. *Biological Conservation*, 2010, 143(4): 873-882.
- [72] Smith R M, Warren P H, Thompson K, Gaston K J. Urban domestic gardens (VI): environmental correlates of invertebrate species richness. *Biodiversity & Conservation*, 2006, 15(8): 2415-2438.
- [73] Fuller R A, Warren P H, Armsworth P R, Barbosa O, Gaston K J. Garden bird feeding predicts the structure of urban avian assemblages. *Diversity and Distributions*, 2008, 14(1): 131-137.
- [74] Gaston K J, Smith R M, Thompson K, Warren P H. Urban domestic gardens (II): experimental tests of methods for increasing biodiversity. *Biodiversity & Conservation*, 2005, 14(2): 395-413.
- [75] Cook W M, Casagrande D G, Hope D, Groffman P M, Collins S L. Learning to roll with the punches: adaptive experimentation in human-dominated systems. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2004, 2(9): 467-474.
- [76] Middel A, Häb K, Brazel A J, Martin C A, Guhathakurta S. Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 122: 16-28.
- [77] Ackley J W, Angilletta M J, DeNardo D, Sullivan B, Wu J G. Urban heat island mitigation strategies and lizard thermal ecology: landscaping can quadruple potential activity time in an arid city. *Urban Ecosystems*, 2015, 18(4): 1447-1459.
- [78] Larson K L, Casagrande D, Harlan S L, Yabiku S T. Residents' yard choices and rationales in a desert city: social priorities, ecological impacts, and decision tradeoffs. *Environmental Management*, 2009, 44(5): 921-937.
- [79] 李锋, 王如松, 赵丹. 基于生态系统服务的城市生态基础设施: 现状、问题与展望. *生态学报*, 2014, 34(1): 190-200.
- [80] Childers D L, Bois P, Hartnett H E, McPhearson T, Metson G S, Sanchez C A. Urban Ecological Infrastructure: an inclusive concept for the non-built urban environment. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 2019, 7: 46.
- [81] Reynolds H L, Mincey S K, Montoya R D, Hamlin S, Sullivan A, Thapa B, Wilson J, Rosing H, Jarzen J, Grove J M. Green infrastructure for urban resilience: a trait-based framework. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2022, 20(4): 231-239.
- [82] Fini A, Frangi P, Faoro M, Piatti R, Amoroso G, Ferrini F. Effects of different pruning methods on an urban tree species: a four-year-experiment scaling down from the whole tree to the chloroplasts. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2015, 14(3): 664-674.
- [83] Norton B A, Bending G D, Clark R, Corstanje R, Dunnett N, Evans K L, Grafius D R, Gravestock E, Grice S M, Harris J A, Hilton S, Hoyle H, Lim E, Mercer T G, Pawlett M, Pescott O L, Richards J P, Southon G E, Warren P H. Urban meadows as an alternative to short mown grassland: effects of composition and height on biodiversity. *Ecological Applications: a Publication of the Ecological Society of America*, 2019, 29(6): e01946.
- [84] Lerman S B, Contosta A R, Milam J, Bang C. To mow or to mow less: lawn mowing frequency affects bee abundance and diversity in suburban yards. *Biological Conservation*, 2018, 221: 160-174.
- [85] Lilly P J, Jenkins J C, Carroll M J. Management alters C allocation in turfgrass lawns. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 134: 119-126.
- [86] Watson C J, Carignan-Guillemette L, Turcotte C, Maire V, Proulx R. Ecological and economic benefits of low-intensity urban lawn management. *Journal of Applied Ecology*, 2020, 57(2): 436-446.
- [87] Oberndorfer E, Lundholm J, Bass B, Coffman R R, Doshi H, Dunnett N, Gaffin S, Köhler M, Liu K K Y, Rowe B. Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services. *BioScience*, 2007, 57(10): 823-833.
- [88] Aloisio J M, Palmer M I, Giampieri M A, Tuininga A R, Lewis J D. Spatially dependent biotic and abiotic factors drive survivorship and physical structure of green roof vegetation. *Ecological Applications: a Publication of the Ecological Society of America*, 2017, 27(1): 297-308.
- [89] Dusza Y, Barot S, Kraepiel Y, Lata J C, Abbadie L, Raynaud X. Multifunctionality is affected by interactions between green roof plant species,

- substrate depth, and substrate type. *Ecology and Evolution*, 2017, 7(7): 2357-2369.
- [90] Berndtsson J C, Bengtsson L, Jinno K. Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs. *Ecological Engineering*, 2009, 35(3): 369-380.
- [91] Berndtsson J C, Emilsson T, Bengtsson L. The influence of extensive vegetated roofs on runoff water quality. *Science of the Total Environment*, 2006, 355(1/2/3): 48-63.
- [92] Zhang Q Q, Wang X K, Hou P Q, Wan W X, Li R D, Ren Y F, Ouyang Z Y. Quality and seasonal variation of rainwater harvested from concrete, asphalt, ceramic tile and green roofs in Chongqing, China. *Journal of Environmental Management*, 2014, 132: 178-187.
- [93] Beecham S, Razzaghmanesh M. Water quality and quantity investigation of green roofs in a dry climate. *Water Research*, 2015, 70: 370-384.
- [94] Bates A J, Sadler J P, Greswell R B, MacKay R. Effects of recycled aggregate growth substrate on green roof vegetation development: a six year experiment. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 135: 22-31.
- [95] Harper G E, Limmer M A, Showalter W E, Burken J G. Nine-month evaluation of runoff quality and quantity from an experiential green roof in Missouri, USA. *Ecological Engineering*, 2015, 78: 127-133.
- [96] 赵银兵, 蔡婷婷, 孙然好, 倪忠云, 张婷婷. 海绵城市研究进展综述: 从水文过程到生态恢复. *生态学报*, 2019, 39(13): 4638-4646.
- [97] Walsh C J, Fletcher T D, Bos D G, Imberger S J. Restoring a stream through retention of urban stormwater runoff: a catchment-scale experiment in a social-ecological system. *Freshwater Science*, 2015, 34(3): 1161-1168.
- [98] Gilbert J K, Clausen J C. Stormwater runoff quality and quantity from asphalt, paver, and crushed stone driveways in Connecticut. *Water Research*, 2006, 40(4): 826-832.
- [99] Chebbo G, Gromaire M C. The experimental urban catchment 'Le Marais' in Paris: what lessons can be learned from it? *Journal of Hydrology*, 2004, 299(3/4): 312-323.
- [100] Hou J M, Han H, Qi W C, Guo K H, Li Z B, Hinkelmann R. Experimental investigation for impacts of rain storms and terrain slopes on low impact development effect in an idealized urban catchment. *Journal of Hydrology*, 2019, 579: 124176.
- [101] 王如松, 李锋, 韩宝龙, 黄和平, 尹科. 城市复合生态及生态空间管理. *生态学报*, 2014, 34(1): 1-11.
- [102] Asbjornsen H, Campbell J L, Jennings K A, Vadeboncoeur M A, McIntire C, Templer P H, Phillips R P, Bauerle T L, Dietze M C, Frey S D, Groffman P M, Guerrieri R, Hanson P J, Kelsey E P, Knapp A K, McDowell N G, Meir P, Novick K A, Ollinger S V, Pockman W T, Schaberg P G, Wullschlegel S D, Smith M D, Rustad L E. Guidelines and considerations for designing field experiments simulating precipitation extremes in forest ecosystems. *Methods in Ecology and Evolution*, 2018, 9(12): 2310-2325.
- [103] Turner W. Sensing biodiversity. *Science*, 2014, 346(6207): 301-302.
- [104] de Boeck H J, Vicca S, Roy J, Nijs I, Milcu A, Kreyling J, Jentsch A, Chabbi A, Campioli M, Callaghan T, Beierkuhnlein C, Beier C. Global change experiments: challenges and opportunities. *BioScience*, 2015, 65(9): 922-931.
- [105] Hendrey G R, Ellsworth D S, Lewin K F, Nagy J. A free-air enrichment system for exposing tall forest vegetation to elevated atmospheric CO₂. *Global Change Biology*, 1999, 5(3): 293-309.
- [106] Genung M A, Fox J, Winfree R. Species loss drives ecosystem function in experiments, but in nature the importance of species loss depends on dominance. *Global Ecology and Biogeography*, 2020, 29(9): 1531-1541.
- [107] Roy J, Rineau F, de Boeck H J, Nijs I, Pütz T, Abiven S, Arnone J A I, Barton C V M, Beenaerts N, Brüggemann N, Dainese M, Domisch T, Eisenhauer N, Garré S, Gebler A, Ghirardo A, Jasoni R L, Kowalchuk G, Landais D, Larsen S H, Leemans V, Le Galliard J F, Longdoz B, Massol F, Mikkelsen T N, Niedrist G, Piel C, Ravel O, Sauze J, Schmidt A, Schnitzler J P, Teixeira L H, Tjoelker M G, Weisser W W, Winkler B, Milcu A. Ecotrons: Powerful and versatile ecosystem analysers for ecology, agronomy and environmental science. *Global Change Biology*, 2021, 27(7): 1387-1407.
- [108] Knapp A K, Avolio M L, Beier C, Carroll C J W, Collins S L, Dukes J S, Fraser L H, Griffin-Nolan R J, Hoover D L, Jentsch A, Loik M E, Phillips R P, Post A K, Sala O E, Slette I J, Yahdjian L, Smith M D. Pushing precipitation to the extremes in distributed experiments: recommendations for simulating wet and dry years. *Global Change Biology*, 2017, 23(5): 1774-1782.
- [109] Quigley K M, Griffith D M, Donati G L, Anderson T M. Soil nutrients and precipitation are major drivers of global patterns of grass leaf silicification. *Ecology*, 2020, 101(6): e03006.
- [110] Hobbie S E, Grimm N B. Nature-based approaches to managing climate change impacts in cities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2020, 375(1794): 20190124.