



DOI: 10.5846/stxb202202280466

王效科, 张红星, 任玉芬, 苏芝敏, 孙旭, 赵露, 欧阳志云. 城市生态系统长期观测研究站及其主要任务. 生态学报, 2023, 43(12): 5211-5223.

城市生态系统长期观测研究站及其主要任务

王效科^{1,2,3,*}, 张红星^{1,3}, 任玉芬^{1,3}, 苏芝敏^{1,3}, 孙旭^{1,3}, 赵露^{1,2}, 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 中国科学院生态环境研究中心北京城市生态系统研究站, 北京 100085

摘要: 随着对城市人居环境质量高度关注, 城市生态学越来越受到重视。城市生态系统长期观测研究站(简称城市生态站), 作为能够跟踪和研究城市生态系统长期变化规律的一种研究手段, 在国内外得到了较快发展。在分析国内外城市生态站的研究经验和实践过程基础上, 提出了城市生态站的科学目标、研究内容和主要工作, 特别就城市生态站的观测工作、模拟实验工作和社会服务的基本框架和工作内容进行了论述, 可以作为城市生态站建设的设计思路。为我国新建和完善城市生态站工作提供重要指导作用。

关键词: 城市生态系统; 长期生态学研究; 生态学研究基础设施; 城市生态学; 野外模拟实验

伴随着社会经济发展, 越来越多的人口聚集在城市。全球一半以上的人口在城市生活工作, 我国城市人口也超过了 63%。城市在发挥社会经济发展引擎作用的同时, 也带来了许多生态环境问题, 如温室气体排放、热岛效应、空气水体污染和洪涝灾害等。随着城市规模日益扩大和未来气候变化加剧, 城市面临的生态环境问题将愈加严峻。因此, 建设包容、健康、弹性、可持续、低碳和绿色的城市, 已经成为全球发展目标之一^[1]和全球碳减排的重要场所^[2]。

生态环境问题的形成和演变是一个长期、多样和不确定的复杂过程, 需要生态家长期的跟踪研究, 为此全球各主要国家都积极开展生态长期研究计划^[3], 如美国的长期生态学研究计划(LTER, <https://lternet.edu>)和国家生态学观测网络(NOEN, <https://www.neonscience.org>)、英国的环境变化研究计划(ECN, <https://ecn.ac.uk>)、德国的长期生态学和生态系统研究网络(LTER-D, <https://www.ufz.de/lter-d/index.php?en=42518>)、法国的区域工作站(Zones Atelier, AZ, <http://www.za-inee.org>)、澳大利亚的陆地生态系统研究网络(TERN, <https://www.tern.org.au>)以及中国生态学研究网络(CERN, <http://www.cern.ac.cn>)。这些生态长期研究计划期望通过对生态系统的长期观测研究, 跟踪生态系统结构和功能变化, 为诊断生态环境问题形成原因和预测生态环境未来变化提供信息支持。在生态学研究的一些重要领域, 如气候变化、生物多样性保护和可持续发展等方面, 长期生态学研究计划已经发挥了很大作用^[4-16]。通过研究人类活动(如土地利用变化、气候变化、氮沉降)和其他干扰活动(火灾、病虫害等)对生态系统的各种影响, 为保护人类生活的家园地球和促进社会经济发展的相关政策的制定提供了大量科学依据。

针对城市生态环境问题面临的挑战, 国内外一些比较重要的城市生态长期研究项目也建立起来了, 如 1997 年开始的美国凤凰城(<https://sustainability-innovation.asu.edu/caplter/>)和巴尔的摩城市生态系统长期研

基金项目: 国家生态系统观测研究共享服务平台能力建设项目; 我国城市生态系统观测实验技术体系与规范研究(NERNC-2018-UES)

收稿日期: 2022-02-28; **网络出版日期:** 2023-02-10

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

究计划 (<https://baltimoreecosystemstudy.org>)、2006 年开始的芬兰赫尔辛基都市地生态站 (<https://deims.org/35e3775a-88bc-483f-aed0-b614ce7736e2>)、2008 年成立的中国生态系统研究网络北京城市生态系统研究站 (<http://bjurban.rcees.ac.cn>)^[17-18]、2020 年开始的美国明尼阿波利斯城市生态系统长期研究计划 (<https://mspurbanlter.umn.edu>)。我国林业部门也成立了多个城市林业生态站(如上海、西安、重庆等)。这些研究项目或研究站通过开展城市生态系统的长期监测和研究,在揭示城市生态环境问题形成机制和演变规律、推动城市生态环境问题综合治理以及促进城市可持续发展方面正在不断起到重要作用。

随着城市生态系统长期研究工作的不断增多,越来越多的政府部门、大学和研究单位都希望建立城市生态系统长期研究站,作为长期开展监测和实验研究的基地,以探索城市生态系统长期演变规律,评价人类活动对城市生态系统的长期影响后果,提出城市生态环境质量提升的政策措施。因此,探讨如何才能建立一个成功的城市生态系统长期观测研究站(以下将简称为城市生态站),对我国未来城市生态站的建设和发展具有重要意义。

目前国内外有关城市生态站的研究工作,主要是以学术论文形式报道各类研究成果,对于城市生态站的建设目标、组织结构、研究内容和研究工作等相关分析还比较少。仅见于:Pickett 等人分析了巴尔的摩城市生态站 20 多年在城市生态学理论方面的突破^[19],王效科等曾介绍了美国凤凰城和巴尔的摩以及中国北京城市生态站的科学问题和监测方法^[17-18],最近又介绍了国外有关城市模拟实验研究工作。从新建和完善城市生态站的社会需要出发,本文将围绕城市面临的生态环境问题和可持续发展需求,提出了城市生态站的定义、目标和任务,分析了城市生态站的监测和模拟实验工作的内容和方法,以期为国内外城市生态站建立提供重要参考。

1 城市生态系统面临的主要挑战

社会经济和科学技术的发展,大量人口从农村迁移进入城市。一方面,农业生产装备自动化,对劳动力的需求不断减少,造成了农村劳动力剩余。另一方面,工业和社会服务业发达,对劳动力的需求不断增加,吸引农村劳动力进入城市。由此引起了城市人口规模和密度的增加。人口在城市的聚集,进一步提高了社会创新能力、劳动生产效率和资源利用效率,推动了社会经济快速发展和提高了人类生活水平^[20]。为满足人口增长的生活生产需求,城市建立了各种各样的生产生活基础设施,提供了更多的工作机会和方便的生活、求学、就医等条件,这将进一步吸引更多的人口聚集在城市。就像滚雪球一样,社会发展不断推动城市规模和强度不断增加。因此也造成了城市人均空间面积的不断压缩,单位土地面积上需要提供的消费品和排放的污染物不断增加。由此引发了一系列城市生态环境问题,如舒适度降低、污染加剧、洪涝灾害频发、过敏人数剧增。其后果降低了城市人居环境质量,直接威胁城市居民的健康和安全^[21]。

城市生态环境问题的形成与城市受到的各种胁迫有关(图 1),主要包括:(1)污染物排放。庞大的城市人口的生产生活需要输入和搬运大量食物和产品,运输工具(如汽车等)就成为许多城市空气污染物的主要来源之一^[22]。食物和日用品消费会排放大量的空气污染物和水体污染物,特别是大量含碳、氮、磷、硫污染物和有毒污染物,是城市空气污染^[23]和水体污染^[24]的主要原因。(2)土地利用变化。城市硬化地表增加、植被变化和湿地减少等。硬化地表改变了城市地表热量平衡,增加了城市近地层显热交换通量,造成城市气温升高,即热岛效应^[25-26]。硬化地表改变了城市水循环过程,降雨产流系数增加,产流速度加快,容易形成城市洪涝灾害^[27-28]。硬化地表沉积的大量污染物,会随暴雨径流进入水体,污染城市地表水^[29]。城市发展不但造成了城市植被面积的减少,而且改变了植被群落结构。植被面积减少导致城市生态系统服务的降低^[30],如植被的降温作用、减少径流和净化污染物等作用减弱。城市人工植物群落增加,造成生态系统服务功能不高,还需要大量灌溉及施用化肥和农药,不但维持成本高,而且对水资源和水环境质量都有很大影响^[31]。城市发展造成了湿地的大量减少和萎缩,损失了湿地生态系统的净化水体污染和储存暴雨径流功能,会加剧城市水污染和暴雨洪涝灾害^[32]。(3)外来生物种类增多。城市建设破坏了自然植被,人们从自身需要出发又向城市引

入了许多外来生物,频繁和广泛的人员和物资运输,将许多外来物种带入了城市^[33-34]。虽然不能否认外来物种的社会经济价值,但一些外来物种给城市带来不利影响,如植物花粉造成的人体过敏现象在许多城市越来越严重^[35-36]。(4)气候变化。城市未来还将面临着新的挑战,如气候变化引起的气温升高和极端天气增加,将改变城市生态系统热量和水文过程,进一步加剧城市热岛效应和洪涝灾害风险^[37]。

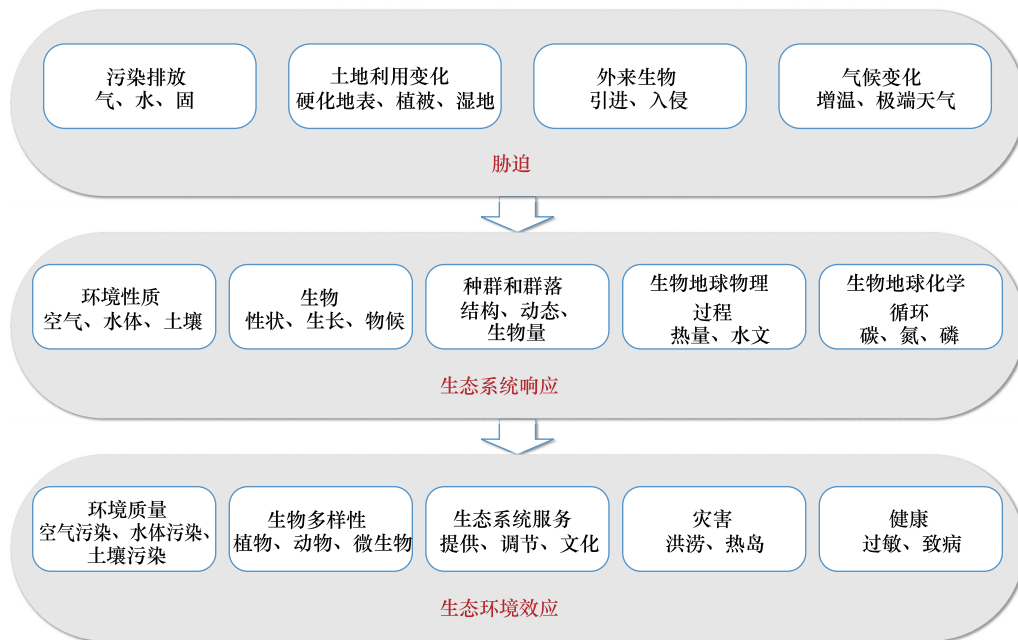


图1 城市生态系统面临的主要挑战

Fig.1 The main challenges of the urban ecosystem

对于城市生态系统来说,目前面临的主要挑战来自于人类胁迫,包括污染排放、土地利用变化、外来生物和气候变化,由此引起了生态系统的一系列改变^[16,21,24],包括生物发育生长物候、种群群落结构和动态、生物地球物理过程和生物地球化学循环,最终会导致城市空气、水体、土壤环境质量下降、洪涝灾害频发、人体健康威胁和生物多样性减少(图1)。城市生态站的建立就是要研究城市面临的胁迫及其引起的生态系统结构和过程变化及其调控方法,以减轻各种人类活动和环境变化对城市生态环境的不良影响。

2 城市生态站及其建站条件

2.1 城市生态站

城市生态站是能够开展城市生态系统长期观测实验的科学研究单位(机构、平台、场所),也可以是一个项目或计划。主要立足于(选择的)典型或(生态)区域代表性的城市,建立和维持长期观测和实验设施,开展城市生态系统要素、结构、过程、功能和服务等方面的信息收集和模拟实验,研究城市生态系统的长期变化规律及其对人类活动和环境变化的响应适应特征,为城市规划、设计和管理提供科学依据。

城市生态站不同于传统生态系统长期观测研究站的是:(1)多尺度特点:城市生态站的研究对象不仅是整个城市,而且还要包括组成城市的各种功能单元和生态系统^[38],具有多尺度性^[39]。不但要研究城市整体的动态变化,而且要分析城市内部组成单元和要素的动态变化。(2)高度空间异质性特点:城市空间上是由不同社会经济功能单元和生态系统斑块镶嵌构成的,景观破碎化严重,空间高度异质性^[40-42]。(3)人与自然耦合特点:城市是以人为主的、人与自然高度耦合的生态系统^[43-45]。人不仅仅是生态系统的外部干扰因素,而且人类活动是城市生态系统的内部过程,直接参与城市生态系统的水碳氮等循环;人工构筑物对城市环境和生物具有决定性作用。因此,城市生态站在观测和实验手段上都需要将人类考虑进去^[46]。

2.2 城市生态站建立条件

城市生态站,面向的城市生态系统长期观测实验研究,其建设需要从长远角度考虑其选址的代表性以及场地和人员等基础条件是否能够满足长期生态学观测研究的需要。

(1)生态区域的代表性:尽管城市生态系统是以人为主导的生态系统,在大范围内具有较强的空间同质化现象,但城市生态系统也不能完全脱离当地地理背景条件而存在,其变化与当地气候、土壤、水文和人文等条件关系密切。从长远生态网络建设来看,不同地理区域都需要建设相应的城市生态站。城市生态站不但需要强调其生态区域代表性,也有优先考虑发展历史长、规模大的综合性城市,具有比较成熟的城市结构和功能,可以优先选择为城市生态站的建设对象。

(2)生态环境问题的典型性:城市生态站建立目的,不仅是为了认识城市生态系统结构功能长期变化规律,而且也是为了解决城市生态环境问题(如热岛效应、洪涝灾害、花粉过敏、生态系统服务降低等),提升城市人居环境质量。因此城市生态站需要优先选择一些具有典型性生态环境问题的城市。

(3)生态学研究场地的稳定性:城市生态站的观测和实验,都需要有相对完整和足够面积的典型城市功能单元和生态系统等作为研究场地,能够建设各种观测实验设施,并保障观测工作和模拟实验项目的长期运行。

(4)研究队伍的优秀性:城市生态站建设需要优秀生态学家和多学科的研究队伍来支撑。需要长期愿意奉献城市生态系统研究的高水平学者和兢兢业业从事日常生态系统观测的工作人员,长期持之以恒工作。

3 城市生态站的目的和建设内容

3.1 城市生态站的目的和任务

城市生态站的目的,就是在选择的典型城市,建设和维持开展城市生态系统格局和过程长期变化研究的观测实验基地,以满足如下研究需求:(1)理解生态系统的内在变化动态,(2)发现变化趋势和基线迁移,(3)捕捉稀有生态事件和未预测的生态突变现象^[15]。

类似于国内外现有的各类生态站^[47],城市生态站主要任务可以具体到以下几个方面:(1)增长知识:提高人类对城市生态系统长期演变规律的认识,丰富城市生态学研究内容;(2)提供信息:向政府部门以及各类研究机构和社会大众提供有关城市生态系统现状和变化的信息,为科学决策提供数据支撑;(3)创造遗产:通过积累数据、标本和样品、构建实验设施,为未来的研究工作提供珍贵的科学遗产;(4)发展教育:邀请中小学和社会各界人员,实际学习有关城市生态学知识,为本科生和研究生提供实习和实验场地;(5)推广示范:开展技术和工程示范,推广城市生态保护和恢复各种措施方法。

3.2 城市生态站建设内容

围绕城市生态系统长期研究,一个完善的城市生态站,应该开展以下至少 4 方面的科学研究硬件建设工作:

(1)选择代表性的城市作为生态学研究场地:城市生态站是为开展城市生态学野外研究提供基地或平台。要求选择开展研究的城市具有代表性,包括城市规模要足够大、生态地域性特征比较明显、生态环境问题比较突出等。并且在所选择的城市中,要有各类代表性的城市功能单元,如公园、居民区、商业区、事业单位等,以及代表性的生态系统类型,如湿地、河湖、林地、草坪等,为开展生态学观测和模拟实验提供合适场地。在城市生态系统研究中,尽管不能排除人类活动,但也要考虑观测研究场地的相对稳定性和不必要人为干扰破坏,以保证研究的生态学问题的代表性。

(2)建立生态学观测设施:城市生态站重要工作是开展生态系统的长期观测,并且要求是对自然界的客观观测。在选择适合的观测场地上,按照城市生态学长期观测内容和设备的要求,建立必要的观测设施,如基座、支架、围栏等,以方便观测仪器的安装、操作和维护。

(3)建立生态学模拟实验设施:城市生态站除观测生态系统自然变化外,也需要研究人类活动或环境因

素变化对生态系统的长期影响,如绿地管理对生态系统长期影响^[48]、地表硬化对植物生长的长期影响^[49]、城市生物长期适应^[50]等。仅仅依靠对现有的生态系统的调查观测,可能难以揭示城市生态系统对环境变化和人类干扰的响应适应机制,特别是自然界存在多种因素的情况下,就很难区分出影响生态系统变化的主要或关键原因。因此,城市生态站也需要建立严格的模拟实验设施,通过控制目标因素和环境条件,开展城市生态系统的长期模拟研究,以验证有关城市生态学的科学假设。

(4) 建立数据资料和样品贮存设施:生态站作为长期研究基地,观测实验数据和样品采集和保存尤为重要,特别是样品是生态站的最终遗产,能够为未来科学研究提供历史材料。因此,需要按照数据和样品保存的规范方法,建立必要的设备设施,将采集到的数据和样品长久保存下来,供未来进行数据分析和样品分析使用,以追溯生态系统长期变化过程。

3.3 城市生态站基本组成

对于一个城市生态站,应该具有完善的组织结构和科学设施,以有效地组织各种资源,共同完成对城市生态系统的长期观测研究任务(图2)。城市生态站首先要具备能够开展观测和实验工作的典型城市功能单元和/或生态系统,作为研究对象,并辅以必要的观测和实验设施,开展自然生境下的生态系统长期研究。城市生态站的自然生境,不但包括天然环境要素和条件,而且也包括人工环境要素和条件。城市生态站为了开展研究工作,维护自然生境和生态系统以及各种研究装置和仪器设备,就需要给研究人员提供必要的工作和生活条件,满足办公、样品保存分析和数据贮存分析,以及吃住等需要。具体包括:

(1) 典型城市功能单元及生态系统及其研究设施:城市生态站首先应具有能够提供给适用于开展高质量研究工作的城市功能单元(如公园、居住区等)和生态系统,这是生态站的立足之本。城市功能单元和生态系统的典型性和完整性直接决定了城市生态站的研究能力。在典型城市功能单元或生态系统中,建立能够满足长期观测研究需要的观测体系和模拟实验体系及其相关研究设施。

(2) 支撑保障条件:为了完成生态系统长期观测研究任务,不但需要各种人力物力财力保障,而且要具有分析和保存实验观测数据和样品的能力,后者对长期生态学研究尤为重要。

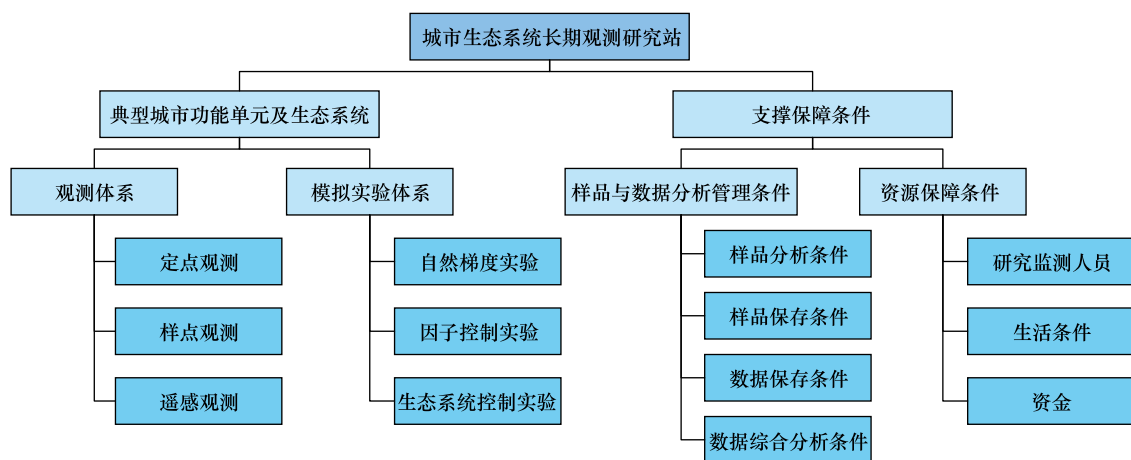


图2 城市生态系统长期研究站基本组成

Fig.2 The basic structure of one long-term monitoring and research urban ecosystem station

4 城市生态站科学目标和研究内容

4.1 科学目标

围绕城市可持续发展,依靠城市生态站,开展城市生态系统的长期观测实验研究工作,以达到以下科学目标:

(1)发现和认识城市生态系统演化规律,特别是生态系统结构、过程和功能长期变化及其对各种干扰因素的长期响应适应特征。

(2)阐明城市环境对城市生物影响机理,特别是在城市新生境(如硬化地表、道路、人工构筑物等)和改变了的生境(如热岛、污染等)下,各种生物(包括植物、动物以及水生生物)的生理生态特征及种群和群落特征的响应适应状况。

(3)揭示城市人与自然相互作用机制,人既是城市发展变化的主导因素,也是城市变化的受益者或受害者。探讨人与自然如何和谐共存,是认识城市生态系统结构功能及其动态变化的关键。

(4)探寻城市环境问题形成机制和减缓措施,针对城市面临的生态环境问题,如热岛效应、空气水体污染、洪涝灾害等,从城市生态系统组分、结构、过程变化等角度,通过长期生态观测和实验,研究其关键影响因素和调控过程,提出改善城市生态环境的对策措施。

(5)探讨城市生态系统健康维持和服务提升途径,围绕城市人居环境质量改善,观测研究城市生态系统健康和服务的变化动态,为城市规划、建设和管理相关技术措施对策的制定提供科学依据。

4.2 研究内容

40年前,美国长期生态学研究计划提出了5个核心研究领域:初级生产力、种群动态、有机质迁移、无机物运移和干扰格局。在1997年将城市生态系统纳入到长期生态学研究计划时,核心研究领域增加了2个:土地利用与覆盖变化和人与环境相互作用^[51]。但具体到每一个生态站,其研究内容都会不一样^[47]。美国的凤凰城和巴尔的摩两个城市生态站的研究内容明显不同^[17]。虽然不需要也不可能要求不同的生态站都采用一样的研究内容^[52],但对于城市生态站的新建和完善工作来说,明确城市生态站的主要研究内容还是很有必要的。为此,围绕目前普遍关心的城市在改善生态环境质量和应对全球气候变化方面的需要,基于生态学长期研究站的长期性、原位性、过程指向和系统探索的特点^[53],城市生态站的长期观测实验研究,重点集中在以下内容:

(1)城市生物多样性:生物多样性是生态系统的基础。在城市建设中,城市的生物多样性受到很大影响^[54]。一方面人类在建筑、绿化、宠物饲养等过程中,有意破坏了一些当地物种或引入了一些外来物种。另一方面,人类活动无意识地引入或消灭了一些生物种类,如一些外来物种随包装材料被引入、一些生物由于失去了生境而消失或迁移。城市生物多样性改变不但表现在植物、鸟类、昆虫、底栖动物等物种多样性上,而且可能表现在基因多样性上,以及生物进化上。

(2)城市生境及其生物适应响应:城市建设对生物生存环境(即生境)的改变是多方面的^[55]。首先城市形成了一些新的生境,如硬化地表、各类建筑物;其次城市改变了生物环境,如城市热岛改变了生物热环境、城市污染将生物置于受污染的空气或被污染的水体环境中,直接危害生物健康;其次城市还会改变动物食物供给和天敌。城市生境的改变直接影响到一些敏感生物,会造成各种不同程度的生物生理生化或个体性状或群落结构的改变。长期生活在城市生境中的有些生物,会通过改变自身生理生化特性或形状,逐渐适应城市生境,甚至产生可以遗传的生物进化现象^[56]。

(3)城市能量、水、碳和氮循环过程:人类不但改变了城市生态系统的组分和结构,也改变了城市生态系统过程,特别是城市生态系统能量流动及水碳氮循环^[24]。城市生态系统过程可以分为两类:一类是人类社会的城市代谢,即城市社会经济活动相关的能量和物质流动过程。二是自然过程为主的生物地球物理和生物地球化学过程。两者共同构成了城市能量流动、水循环、碳循环和氮循环复合过程。这些生态系统过程,与城市发展有关,也是造成一些城市生态环境问题,如碳排放、空气污染、水体有机物和氮污染等的重要原因。

(4)城市生态基础设施:城市土地利用变化和人类活动,制约和降低了城市生态系统服务的提供能力。通过恢复和建设城市生态基础设施^[57],可以帮助改善城市人居环境和人类生产生活条件,促进城市可持续发展。因此,研究城市生态基础设施(如绿地、湿地等)在减缓城市热岛效应和洪涝灾害危害、提高碳固定和人类康养等方面的作用及其形成机理,探讨城市生态保护恢复的有效措施,应该作为城市生态系统长期研究的重要内容。

5 城市生态站主要工作

和其他长期生态系统长期研究生态站的主要工作一样^[58-60],城市生态站面向城市发展过程的生态学问题,主要开展观测、实验和服务三个方面工作(图3)。观测工作主要包括遥感观测、地面调查观测、流动观测、定位观测和社会调查等。实验工作主要包括自然梯度实验、原位实验、环境因子影响实验、地表变化实验和景观实验等,服务主要包括面向社会的服务于生态规划、生态工程建设、生态管理和生态教育等工作。

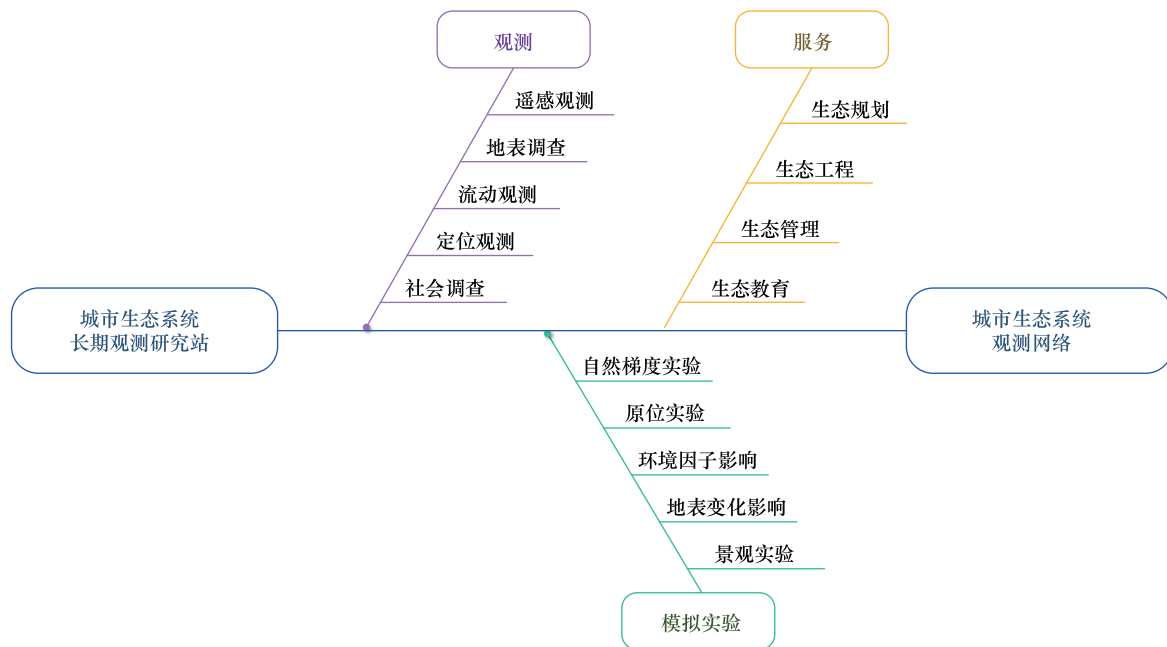


图3 城市生态系统长期观测研究站的主要工作

Fig.3 The main tasks of a long-term monitoring and research station of urban ecosystem

5.1 城市生态站观测工作

观测是发现、探测生态系统长期变化过程的重要科学研究手段。观测作为城市生态站三大任务之一,也是生态站模拟实验研究和提供社会服务的基础。

对于非常复杂的城市生态系统,可以采用系统结构-过程-功能等多方面的属性指标评价其变化。有些指标变化非常快,而有些则比较缓慢,只有采用高精度的仪器和一致的技术手段,按照严格的观测程序和质量控制进行观测,才能够获得生态系统演变的可靠信息。生态站的长期观测工作至少具有两个优势:一是跟踪变化比较慢的生态系统属性或生态系统对一些长期或慢性干扰胁迫事件的响应,如土壤有机碳变化、生产力变化、温度升高长期影响等。二是捕捉发生很少或极端情况下的干扰对生态系统的影响,如干旱、火灾、洪涝、热浪和飓风等,长期观测作为一种预设实验对照(pretreatment control),能够比较分析干扰前后生态系统变化。观测还有助于发现很多人类未预见到的自然条件下的生态系统长期变化状况。

城市生态站采用不同观测平台、手段、方式和频率,开展城市生态系统的要素、格局和过程的观测,为城市生态学机制探讨和城市生态系统的评价、预测和预警提供数据服务(图4)。城市生态站的观测平台可以是空间卫星、中低空飞行器和地面设施。观测手段可以是物理的、化学的,也可以是生物的,甚至是综合性的。观测方式可以人工观测,也可以自动观测;可以现场观测,还可以现场采样实验室分析。观测频率可以多样化,可以定期观测,如每小时、日、每季度或每年,也可以连续观测。城市生态站的观测内容包括:(1)环境要素观测:包括空气(包括气象、空气质量、热岛效应等)、水体(包括水文和水质)、土壤(包括物理、化学和生物学属性)的观测。(2)生物观测:可以从个体、种群和群落不同组织层级上,对植物、动物和微生物进行观测。(3)

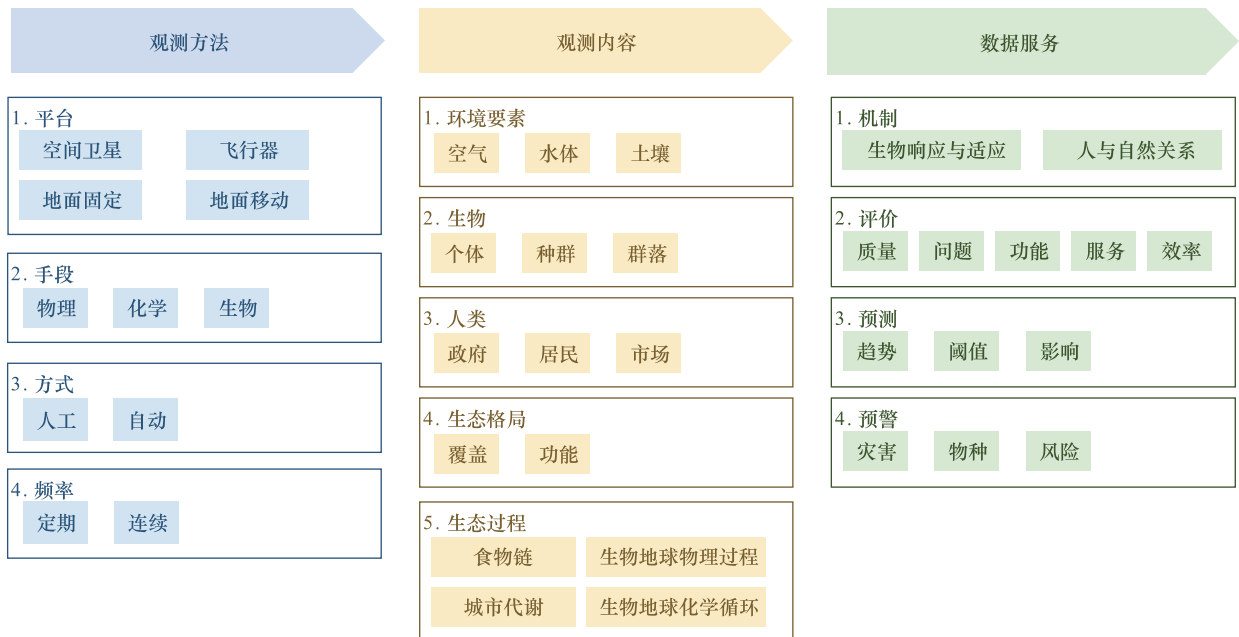


图 4 城市生态系统长期研究站观测体系概念框架

Fig.4 The monitoring conceptual framework for long-term monitoring urban ecosystem

人类;包括各种人类活动,特别是对政府、居民和市场信息的调查和收集。(4)生态格局观测:包括土地覆盖等自然属性单元和社会经济功能属性单元的空间分布状况观测。(5)生态过程观测:包括食物链(生产力、生物量等)、生物地球物理过程(能量平衡和水文过程与水量平衡)、生物地球化学循环(典型元素:碳、氮、硫、磷循环等)、城市代谢(资源、建筑和日用品的生产消费)。通过长期观测,获得了大量有关生态系统结构和过程的信息,可以进一步开展(1)城市生态学机理研究,分析城市生物对环境的响应和适应,以及城市人与环境间的关系;(2)城市生态评价,评价城市生态系统的质量、功能、服务和效率等,以发现问题;(3)城市生态系统预测,预测城市生态系统未来变化趋势、变化阈值和可能影响;(4)生态系统预警:对城市生态系统可能出现的灾害、物种变化和各種风险进行预警。

5.2 模拟实验工作

模拟实验是通过设定环境条件或构建生态系统,探寻和验证环境条件与生态系统响应间的关系。通过人为设置一些干扰或环境条件,结合对照观测,探索生态系统变化原因和验证生态系统受干扰后的变化特征。如增温实验、养分实验、干旱实验和生物多样性实验等。通过模拟实验可以证明:一种现象是否存在?一定条件下会不会出现某种事件或现象?一个推断是否正确?一种事件或措施是否有效?一种人类活动的影响后果如何?实验的目的是突显出关注因子的影响和排除非关注因子的影响。由于模拟实验是按照严格统计学方法设计的,实验观测结果的可靠性更强。从自然界直接观测过程中,人类能够发现许多有价值的科学成果,但对这些科学成果的起因解释和影响因素识别还需要通过模拟实验来证明。因为在自然条件下,生态系统常常会受到多个因素同时影响或出现多个过程同时变化,很难区分出到底是哪一因素或过程起关键作用。并且,自然界的许多现象很难重复,观测时可能并没有对所有的影响因素或过程进行观测。因此,通过模拟实验,就可以来验证已经发现的科学成果或科学假设。模拟实验的好处在于能够重复、单因子或多因子控制、多变量同时观测。模拟实验越来越受到生态学期研究的重视^[61]。因此,城市生态站应该建立模拟实验系统,通过人为设定环境条件和控制生态系统,研究城市生态系统长期变化规律。

模拟实验作为城市生态站的一种重要研究手段,越来越得到城市生态学家的重视。通过模拟实验,从科学上,有助于认识城市生物对环境变化的响应适应机制,揭示城市生态系统特征及其变化规律,探索人与自

相互关系机制,明确城市生态环境问题形成机制;从实践上,有助于提出城市生态环境问题(如热岛效应、环境污染、洪涝灾害以及生物多样性变化、生态系统服务和人居环境质量下降等)预防和减缓途径与对策措施,为城市可持续发展提供科学支撑。

城市生态站模拟实验就是在城市环境中,选择合适的实验场地,构建需要的实验条件和设施,对环境因素或干扰进行控制,然后观测植物、动物、生境(土壤、空气、水体等)和生态系统属性的变化,研究城市生态系统长期变化的原因和相关科学问题,为揭示城市生态学规律及其应用提供可靠的科学依据(图5)。城市生态站模拟实验的控制方法包括天然梯度实验和人为控制实验。前者是利用自然形成的环境条件梯度或类型,开展实验研究,如城乡梯度实验、热岛梯度实验、河流上下游梯度实验、上下风梯度实验、不同功能区实验等。后者可以采用人为加减、隔离和置换等方法,控制环境条件以达到目标水平,研究环境胁迫下城市生物及生态系统的响应适应特征,如增温实验、污染物添加实验、干旱(减雨)实验等。城市生态站模拟实验常见的可控制的环境因素有空气成分、降水径流、光照、地表覆盖和生物等。对于不同环境因素可以采用不同的实验设施和控制方法。控制实验还可以构建或控制生态系统,包括对天然生态系统和人造生态系统的控制。前者是指自然状态的生态系统,后者是为人工建造的实验生态系统。城市生态站模拟实验中的观测包括两类:一是响应状况观测,即观测生态系统或环境因素对控制因素的响应状况;二是实验环境观测,即观测实验期间的设定目标或其他环境因素的实际变化状况,以评价实验过程中设定的环境因素目标值是否达到了要求,实验是否受到其他因素变化的影响。由于生态系统的复杂性,模拟实验中需要观测的内容可能比较多,包括生物(植物和动物的生长、活动、物候、生理生化指标等)、土壤(养分和污染物状况、有机质分解及氮素的硝化反硝化状况)、水体(水量、水质和水生生物状况)、空气(温度、湿度、成分等)以及生态系统过程(地气交换、径流等)。这需要根据实验目的、内容和要求而确定。最后就是分析实验得到的各种观测数据,服务于验证城市生态学一些重要理论(如生物与环境作用机制、生物地球化学循环规律、人与自然耦合作用等)和评价人类活动的影响(如生态影响评价、绿化树种筛选、绿地群落构建、城市土地规划等)。

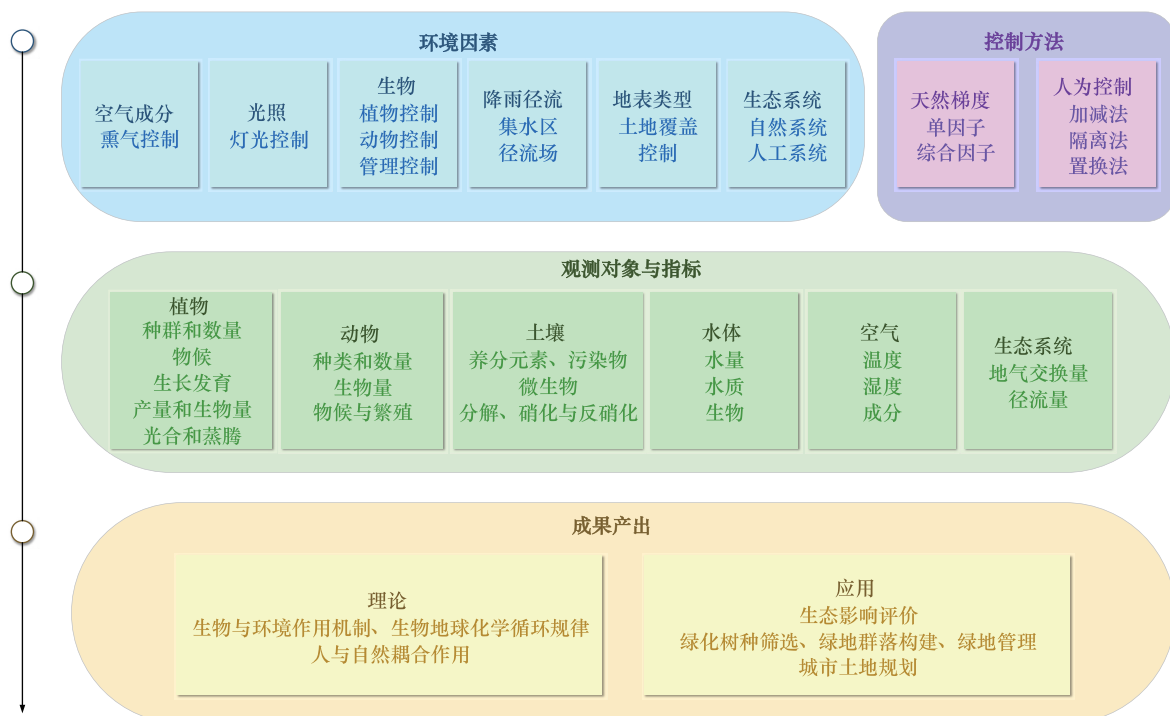


图5 城市生态系统长期研究站实验体系概念框架

Fig.5 The conceptual framework of experimental system of one urban ecosystem long-term research station

5.3 社会服务工作

通过观测和模拟实验,得到了对城市生态系统的深入认识和大量基础数据,可以为生态预报(ecological forecasting)提供科学支撑^[62]。生态站作为长期生态学研究基地,本身具有具有一些资源:如典型的城市功能单元和生态系统、各类研究成果和专家队伍,都可以提供多种社会服务,如政策咨询、模式示范和教育推广等。特别是为培养生态学硕士和博士提供观测和实验场地。并及时将研究成果与社会分享,以得到社会认可和支持,这对生态站的长期观测和实验工作稳定持续具有重要作用。

6 结论

伴随着城市规模和人口的不断增加,对城市人居环境质量的社会关注度的持续升高,城市生态学也进入了快速发展时期。生态学在研究城市生态系统短期变化的时候,越来越认识到城市生态系统长期变化对人类社会的重要性。

因此,纷纷开始借鉴国内外长期生态系统研究计划的经验,建立多个城市生态系统长期观测研究站,通过跟踪城市生态系统长期发展变化,研究城市生态环境问题及其影响因素,为城市规划管理政策的制定提供科学依据。本文在分析城市生态环境面临的挑战基础上,系统阐述了城市生态站的建立条件、建设目标、建设内容以及科学目标、研究内容,并分析了3项主要工作(观测、模拟实验和服务)。尽管这些分析是一个粗线条的,目的是为建设城市生态站提供一些重要理论框架和实践指导。

城市生态站作为一种重要的生物研究基础设施^[63],是一项需要大量的、持续的、长期投资的工程项目。其建设和维持需要大量详细的工作方案,读者可以进一步查阅国内外现有城市生态站的网站和作者以前和后续的论文^[17]。最后,针对建设和完善城市生态站,本研究还将提出如下建议:(1)聚焦重点:对于复杂的城市生态系统来说,目前面临的生态环境问题不少,可以开展的生态观测和模拟实验的内容也很多,但由于人力物力财力等限制,一个生态站应该和能够做什么,需要根据所研究城市生态系统的特点、生态环境问题、个人研究兴趣和具有的研究条件等,明确重点关注的观测和实验内容,筛选出可操作的关键性(vital)的观测和实验内容和指标,真正能够将城市生态系统观测和实验坚持下去,积累长期可靠的生态学数据,为有效协调城市生态系统中人与自然关系,开展城市科学规划和管理提供科学依据。(2)考虑城市生态系统特殊性:不同于传统的森林、草原和农田生态系统,城市生态系统是一个区域生态系统,具有高度空间异质性^[42]和高度人与自然复合性^[45],因此,城市生态站的长期观测研究工作中,需要考虑:1)多种生态系统类型及其空间分布格局,2)城市社会经济功能单元(如公园、社区、办公区、学校等)生态功能,3)人类生产生活活动及其生态效应,4)人工构筑物的生态效用和生态价值。(3)联网研究:单个城市生态站建设,只能回答单个城市或某一地区城市或某一类型城市面临生态环境的问题,并且单个城市得出的城市生态学规律也不一定具有普遍性。因此,只有在不同生态区建立多个城市生态站,并构成网络^[64],才能科学评价全国或全球尺度的城市生态环境问题及其变化,为实现全球城市可持续发展目标提供数据和理论支撑。

参考文献(References):

- [1] United Nations. Transforming our World: the 2030 Agenda for Sustainable Development. New York: United Nations, 2015.
- [2] Shuaib Lwasa, Karen C. Seto, Bai X M, Hilda Blanco, Kevin Gurney, Şiir Kılış, Oswaldo Lucon, Jin Murakami, Pan J H, Ayyoob Sharifi, Yoshiki Yamagata. Urban systems and other settlements// Carolina Dubeux, Diana Ürge-Vorsatz eds. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- [3] Waide R B. Sustaining long-term research: collaboration, multidisciplinary and synthesis in the long-term ecological research program//Willig M R, Walker L R, eds. Long-term Ecological Research: Changing the Nature of Scientists. New York: Oxford University Press, 2016: 29-42.
- [4] White P S. Long-term studies in ecology: approaches and alternatives. Likens Gene E., ed. Springer-Verlag, New York, 1989. 214 pp., illus. \$49.00 (ISBN 0-387-96743-5 cloth). BioScience, 1990, 40(1): 55-57.
- [5] Greenland D, Goodin D G, Smith R C. Climate Variability and Ecosystem Response at Long-Term Ecological Research Sites. New York: Oxford University Press, 2003.

- [6] Turner M G, Collins S L, Lugo A L, Magnuson J J, Rupp T S, Swanson F J. Disturbance dynamics and ecological response: the contribution of long-term ecological research. *BioScience*, 2003, 53(1): 46-56.
- [7] Collins S L, Carpenter S R, Swinton S M, Orenstein D E, Childers D L, Gragson T L, Grimm N B, Grove J M, Harlan S L, Kaye J P, Knapp A K, Kofinas G P, Magnuson J J, McDowell W H, Melack J M, Ogden L A, Robertson G P, Smith M D, Whitmer A C. An integrated conceptual framework for long-term social-ecological research. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, 9(6): 351-357.
- [8] Peters E B, Hiller R V, McFadden J P. Seasonal contributions of vegetation types to suburban evapotranspiration. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(G1): G01003.
- [9] Dodds W K, Robinson C T, Gaiser E E, Hansen G J A, Powell H, Smith J M, Morse N B, Johnson S L, Gregory S V, Bell T, Kratz T K, McDowell W H. Surprises and insights from long-term aquatic data sets and experiments. *BioScience*, 2012, 62(8): 709-721.
- [10] Willig M R, Walker L. *Long-Term Ecological Research: Changing the Nature of Scientists*. Oxford: Oxford University Press, 2016.
- [11] Schooler N K, Dugan J E, Hubbard D M, Straughan D. Local scale processes drive long-term change in biodiversity of sandy beach ecosystems. *Ecology and Evolution*, 2017, 7(13): 4822-4834.
- [12] Kominoski J S, Gaiser E E, Baer S G. Advancing theories of ecosystem development through long-term ecological research. *BioScience*, 2018, 68(8): 554-562.
- [13] Harmon M E, Pabst R J. The long-term effects of wind disturbance on a Sitka spruce-western hemlock forest. *Forests*, 2019, 10(2): 119.
- [14] Gaiser E E, Bell D M, Castorani M C N, Childers D L, Groffman P M, Jackson C R, Kominoski J S, Peters D P C, Pickett S T A, Ripplinger J, Zinnert J C. Long-term ecological research and evolving frameworks of disturbance ecology. *BioScience*, 2020, 70(2): 141-156.
- [15] Hughes B B, Beas-Luna R, Barner A K, Brewitt K, Brumbaugh D R, Cerny-Chipman E B, Close S L, Coblenz K E, de Nesnera K L, Drobnitch S T, Figurski J D, Focht B, Friedman M, Freiwald J, Heady K K, Heady W N, Hettinger A, Johnson A, Karr K A, Mahoney B, Moritsch M M, Osterback A M K, Reimer J, Robinson J, Rohrer T, Rose J M, Sabal M, Segui L M, Shen C C, Sullivan J, Zuercher R, Raimondi P T, Menge B A, Grorud-Colvert K, Novak M, Carr M H. Long-term studies contribute disproportionately to ecology and policy. *BioScience*, 2017, 67(3): 271-281.
- [16] Grimm N B, Pickett S T A, Hale R L, Cadenasso M L. Does the ecological concept of disturbance have utility in urban social-ecological-technological systems? *Ecosystem Health and Sustainability*, 2017, 3(1): e01255.
- [17] 王效科, 欧阳志云, 仁玉芬, 王华锋. 城市生态系统长期研究展望. *地球科学进展*, 2009, 24(8): 928-935.
- [18] 王效科, 欧阳志云, 任玉芬, 张红星. 中美城市生态系统长期监测的内容和方法. *地球科学进展*, 2014, 29(5): 617-623.
- [19] Pickett S T A, Cadenasso M L, Baker M E, Band L E, Boone C G, Buckley G L, Groffman P M, Grove J M, Irwin E G, Kaushal S S, LaDeau S L, Miller A J, Nilon C H, Romolini M, Rosi E J, Swan C M, Szlavecz K. Theoretical perspectives of the baltimore ecosystem study: conceptual evolution in a social-ecological research project. *BioScience*, 2020, 70(4): 297-314.
- [20] Batty M. The size, scale, and shape of cities. *Science*, 2008, 319(5864): 769-771.
- [21] Grimm N B, Grove J G, Pickett S T A, Redman C L. Integrated approaches to long-term studies of urban ecological systems: urban ecological systems present multiple challenges to ecologists-pervasive human impact and extreme heterogeneity of cities, and the need to integrate social and ecological approaches, concepts, and theory. *BioScience*, 2000, 7(50): 571-584.
- [22] Wang H K, He X J, Liang X Y, Choma E F, Liu Y F, Shan L, Zheng H T, Zhang S J, Nielsen C P, Wang S X, Wu Y, Evans J S. Health benefits of on-road transportation pollution control programs in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(41): 25370-25377.
- [23] Coggon M M, Gkatzelis G I, McDonald B C, Gilman J B, Schwantes R H, Abuhassan N, Aikin K C, Arend M F, Berkoff T A, Brown S S, Campos T L, Dickerson R R, Gronoff G, Hurley J F, Isaacman-VanWertz G, Koss A R, Li M, McKeen S A, Moshary F, Peischl J, Pospisilova V, Ren X R, Wilson A, Wu Y H, Trainer M, Warneke C. Volatile chemical product emissions enhance ozone and modulate urban chemistry. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(32): e2026653118.
- [24] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, Redman C L, Wu J G, Bai X M, Briggs J M. Global change and the ecology of cities. *Science*, 2008, 319(5864): 756-760.
- [25] Hamstead Z A, Farmer C, McPhearson T. Landscape-based extreme heat vulnerability assessment. *Journal of Extreme Events*, 2018, 5(4): 1850018.
- [26] Madrigano J, Ito K, Johnson S, Kinney P L, Matte T. A case-only study of vulnerability to heat wave-related mortality in New York City (2000—2011). *Environmental Health Perspectives*, 2015, 123(7): 672-678.
- [27] Depietri Y, McPhearson T. Integrating the grey, green, and blue in cities: nature-based solutions for climate change adaptation and risk reduction//Kabisch N, Korn H, Stadler J, Bonn A, eds. *Nature-based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas: Linkages Between Science, Policy and Practice*. Cham: Springer, 2017: 91-109.

- [28] Pallathadka A, Sauer J, Chang H E J, Grimm N B. Urban flood risk and green infrastructure: who is exposed to risk and who benefits from investment? A case study of three U.S. cities. *Landscape and Urban Planning*, 2022, 223: 104417.
- [29] Müller A, Österlund H, Marsalek J, Viklander M. The pollution conveyed by urban runoff: a review of sources. *Science of the Total Environment*, 2020, 709: 136125.
- [30] Livesley S J, McPherson E G, Calfapietra C. The urban forest and ecosystem services: impacts on urban water, heat, and pollution cycles at the tree, street, and city scale. *Journal of Environmental Quality*, 2016, 45(1): 119-124.
- [31] Hobbie S E, Finlay J C, Janke B D, Nidzgorski D A, Millet D B, Baker L A. Contrasting nitrogen and phosphorus budgets in urban watersheds and implications for managing urban water pollution. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(16): 4177-4182.
- [32] Palta M M, Grimm N B, Groffman P M. "Accidental" urban wetlands: ecosystem functions in unexpected places. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2017, 15(5): 248-256.
- [33] Faeth S H, Bang C, Saari S. Urban biodiversity: patterns and mechanisms. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2011, 1223(1): 69-81.
- [34] Shaffer H B. Urban biodiversity arks. *Nature Sustainability*, 2018, 1(12): 725-727.
- [35] Cariñanos P, Casares-Porcel M. Urban green zones and related pollen allergy: a review. Some guidelines for designing spaces with low allergy impact. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 101(3): 205-214.
- [36] Sousa-Silva R, Smargiassi A, Kneeshaw D, Dupras J, Zinszer K, Paquette A. Strong variations in urban allergenicity riskscape due to poor knowledge of tree pollen allergenic potential. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 10196.
- [37] Dodman D, Hayward B, Pelling M, Castán Broto V, Chow W, Chu E, Dawson R, Khirfan L, McPhearson T, Prakash A, Zheng Y, Ziervogel G. Cities, settlements and key infrastructure//Pörtner H O, Roberts D C, Tignor M, Poloczanska E S, Mintenbeck K, Alegría A, Craig M, Langsdorf S, Löschke S, Möller V, Okem A, Rama B, eds. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- [38] 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.
- [39] Zhang C, Wu J G, Grimm N B, McHale M, Buyantuyev A. A hierarchical patch mosaic ecosystem model for urban landscapes: model development and evaluation. *Ecological Modelling*, 2013, 250: 81-100.
- [40] Cadenasso M L, Pickett S T A, Schwarz K. Spatial heterogeneity in urban ecosystems: reconceptualizing land cover and a framework for classification. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, 5(2): 80-88.
- [41] Pickett S T A, Cadenasso M L, Rosi-Marshall E J, Belt K T, Groffman P M, Grove J M, Irwin E G, Kaushal S S, LaDeau S L, Nilon C H, Swan C M, Warren P S. Dynamic heterogeneity: a framework to promote ecological integration and hypothesis generation in urban systems. *Urban Ecosystems*, 2017, 20(1): 1-14.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] Pickett S T A, Cadenasso M L, Grove J M, Nilon C H, Pouyat R V, Zipperer W C, Costanza R. Urban ecological systems: Linking terrestrial ecological, physical, and socioeconomic components of metropolitan areas. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2001, 32: 127-157.
- [45] 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.
- [46] Alberti M. *Advances in Urban Ecology: Integrating Humans and Ecological Processes in Urban Ecosystems*. New York: Springer, 2008: 1-366.
- [47] Hobbie J E, Carpenter S R, Grimm N B, Gosz J R, Seastedt T R. The US long term ecological research program. *BioScience*, 2003, 53(1): 21-32.
- [48] 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*, 2019, 29(6): e01946.
- [49] 崔博文, 汪旭明, 苏跃波, 于伟伟, 陈媛媛, 王效科. 城市林木生物量对硬化地表和种植密度的响应. *生态学报*, 2022, 42(11): 4463-4472.
- [50] Felson A J, Oldfield E E, Bradford M A. Involving ecologists in shaping large-scale green infrastructure projects. *BioScience*, 2013, 63(11): 882-890.
- [51] Hobbie J E. Scientific accomplishments of the long term ecological research program: an introduction. *BioScience*, 2003, 53(1): 17-20.
- [52] Church M J, Cloern J E, Evans-White M, Grebmeier J M, Hernández D, Laney C M, North G. Decadal Review of the Long-Term Ecological Research Program: A report of the 40 Year Review Committee. Alexandria: National Science Foundation, 2022.
- [53] Mirtl M, Borer E T, Djukic I, Forsius M, Haubold H, Hugo W, Jourdan J, Lindenmayer D, McDowell W H, Muraoka H, Orenstein D E, Pauw J

- C, Peterseil J, Shibata H, Wohner C, Yu X, Haase P. Genesis, goals and achievements of long-term ecological research at the global scale: a critical review of ILTER and future directions. *Science of the Total Environment*, 2018, 626: 1439-1462.
- [54] Swan C M, Brown B, Borowy D, Cavender-Bares J, Jeliazkov A, Knapp S, Lososová Z, Padullés Cubino J, Pavoine S, Ricotta C, Sol D. A framework for understanding how biodiversity patterns unfold across multiple spatial scales in urban ecosystems. *Ecosphere*, 2021, 12(7): e03650.
- [55] James P. *The Biology of Urban Environments*. Oxford: Oxford University Press, 2018: 1-294.
- [56] Alberti M. Eco-evolutionary dynamics in an urbanizing planet. *Trends in Ecology & Evolution*, 2015, 30(2): 114-126.
- [57] 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.
- [58] 牛栋, 黄铁青, 杨萍, 于贵瑞. 中国生态系统研究网络(CERN)的建设与思考. *中国科学院院刊*, 2006, 21(6): 466-471.
- [59] 于贵瑞, 于秀波. 中国生态系统研究网络与自然生态系统保护. *中国科学院院刊*, 2013, 28(2): 275-283.
- [60] 杨萍. 中国科学院野外科学观测研究网络未来发展的思考. *中国科学院院刊*, 2021, 36(1): 104-112.
- [61] 杨萍, 白永飞, 宋长春, 吴冬秀. 野外站科研样地建设的思考、探索与展望. *中国科学院院刊*, 2020, 35(1): 125-134.
- [62] Clark J S, Carpenter S R, Barber M, Collins S, Dobson A, Foley J A, Lodge D M, Pascual M, Pielke R, Pizer W, Pringle C, Reid W V, Rose K A, Sala O, Schlesinger W H, Wall D H, Wear D. Ecological forecasts: an emerging imperative. *Science*, 2001, 293(5530): 657-660.
- [63] Parsons J P, Duke C S, Klein M L. Getting creative to sustain research infrastructure. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, 9(5): 255-255.
- [64] Peters D P C, Loescher H W, SanClements M D, Havstad K M. Taking the pulse of a continent: expanding site-based research infrastructure for regional-to continental-scale ecology. *Ecosphere*, 2014, 5(3): 1-23.