

DOI: 10.5846/stxb201901300221

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.

Wang X K, Su Y B, Ren Y F, Zhang H X, Sun X, Ouyang Z Y. Urban ecosystem: human and nature compounding. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(15): 5093-5102.

城市生态系统：人与自然复合

王效科^{1,2,3,*}, 苏跃波^{1,3}, 任玉芬^{1,2}, 张红星^{1,2}, 孙旭^{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 中国科学院北京城市生态系统研究站, 北京 100085

3 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 随着城市化快速发展, 城市生态学进入了空前繁荣时期, 一些新理念和范式引起了广泛关注。从生态系统角度, 分析了城市生态系统组分、结构、过程、功能和服务的特点, 提出了城市生态系统研究的黑箱范式和结构-过程-功能-服务级联范式。重点分析了人与自然在城市生态系统的组分、结构、过程、功能和服务等方面的不同角色, 探讨了人与自然在城市生态系统组分上镶嵌、结构上融合、过程上耦合、功能上互补和服务上协同的相互作用机制, 提出了城市生态系统研究的人与自然共同进化范式, 即人类和自然相互作用和适应, 推动了城市发展。这将为深入认识和研究城市生态系统提供重要理论支撑。

关键词: 城市生态系统; 研究范式; 人与自然; 共存进化

Urban ecosystem: human and nature compounding

WANG Xiaoke^{1,2,3,*}, SU Yuebo^{1,3}, REN Yufen^{1,2}, ZHANG Hongxing^{1,2}, SUN Xu^{1,2}, 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 Beijing Urban Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

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

Abstract: With the rapid development of urbanization, urban ecology has entered an unprecedented period of prosperity, and some new concepts and paradigms have drawn wide attention. We analyzed the characteristics of component, structure, processes, functions, and services from the perspective of ecosystem and proposed the “black box” paradigm and “structure-process-function-service cascade” paradigm for urban ecosystem research. We also explored different roles of human and nature in the component, structure, process, function and services of urban ecosystem, discussed the interactive mechanisms between human and nature by mosaic component, fused structure, coupled process, complementary function, and synergized service within urban ecosystem. It is proposed the paradigm of co-evolution of human and nature for urban ecosystem research. It will provide important theoretical support for the in-depth understanding and research of urban ecosystem.

Key Words: urban ecosystem; research paradigm; human and nature; co-evolution

世界上已经有超过一半的人口居住在城市中。人类也从农民社会进入了市民社会。2018 年底我国人口城市化率达 59.6%, 城市数量达 672 个。在发达国家, 如美国、加拿大和澳大利亚等, 城市人口数量已经超过

基金项目: 国家自然科学基金项目(71533005); 国家重点研发计划(2016YFC0503004)

收稿日期: 2019-01-30; 网络出版日期: 2020-05-21

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

总人口的 85%^[1]。城市集中了全球 80% 以上的人类社会经济活动^[2]。由于城市能够为人类提供良好的就业、教育、医疗等机会,吸引越来越多人口不断向城市聚集,城市的数量和规模都在不断扩大。城市一方面是人类思想、商业、文化、科学、生产和社会活动的聚集地,为人类提供了更多的发展机会和空间,成为了社会经济发展的主要引擎;另一方面,城市人口的高度聚集和生产生活的极度活跃,远远超出自身的资源供养和废物消纳能力,造成了资源过度消耗和环境严重恶化,导致城市居民生活质量出现下降,拥挤、污染、犯罪等问题严重影响了城市的可持续发展。因此,联合国将建设包容、安全、弹性和可持续的城市作为 17 个人类可持续发展目标之一^[3]。

城市是一类高强度人类影响的地方或区域,以人工建造环境为主,支撑了超过一定数量的人口(如不少于 1000 人^[1])。在城市土地上,人类为了提高生活质量和生产效率,既对原有的自然生境进行了改造,如人工管理的草坪和花园,也构建或形成了一系列的新的生境,如房屋、道路、公园等。这些生境可以统称为城市生境。这些城市生境不但对促进社会经济发展和提高生产生活水平具有很大的作用,而且对城市中的各种生物(如动物、植物及微生物)具有多方面的影响,其影响将最终影响到整个城市生态系统,进而影响到城市居民的生活质量和生产效率。

城市生态学作为一门研究城市区域中的生物与环境间相互关系的学科,最初主要研究城市生境中的生物变化^{[4][5]},即城市中的生态学(Ecology in city)。随着生态学家对城市生态环境问题的持续关注,将生态系统研究理念和方法应用到城市生态学的研究中^[6],形成城市的生态学(Ecology of city),提出城市生态系统这一核心概念。近年来,全球城市人口快速发展和城市环境问题的日益突出,城市可持续发展越来越需要城市生态学的理论和方法指导,就出现了面向城市的生态学,强调城市生态学研究应该更多关心城市规划和管理的社会需求^[7]。

随着城市在人类生存和发展中的地位不断提升,城市生态学进入了空前的快速发展阶段。来自生态学、环境科学、社会学、园林学和城市规划学等专业的科学家纷纷加入到城市生态学的研究队伍,极大地推动了城市生态学的发展。对于城市这样一个由自然环境、生物和人类构成的复杂生态系统,可以采用多种思路和方法开展研究。特别是构建具有一定适应性的统一科学研究范式(Paradigm),将有利于促进不同研究工作的交流和研究成果的比较。从科学研究角度,范式就是一种公认的模式或模式^[8],是一种对本体论、认识论和方法论的基本承诺,是科学家群体所共同接受的一组假说、理论、准则和方法的总和。在传统生态学研究中,已经形成了许多研究范式,如组织层级水平、生态系统结构、群落演替、顶级群落、食物链等。这些范式对于指导生态学家开展生物与环境关系研究发挥了很大作用。城市生态学的研究,同样需要一些研究范式来规范和指导。本文将在分析国内外城市生态学研究现状的基础上,基于生态学及相关学科的研究范式,从生态系统角度,拟系统总结一些重要的城市生态学研究范式,为科学地认识、表征、模拟、诊断和预测城市生态系统及其变化提供方法学基础。

1 城市是生态系统

生态系统是一个由生物群落与其周围组分构成的系统^[9]。事实上,由于任何生物生存都离不开环境,都会和周围环境构成一个生态系统。生态系统概念的提出,让我们认识到研究生物,应该将生物与其周围环境作为一个整体考虑^[10]。当生物和环境构成一个系统时,就会表现出新的属性和功能。城市作为一个地域单元,尽管具有高度人工化的结构,但也离不开其他生物的支持,或逃脱不了其他生物的侵染,内部包含各种生物,这些生物会与其环境构成一个完整的生态系统。将城市作为一个生态系统进行研究,即城市的生态学。城市生态系统可以定义为:城市区域内所有生物(包括人类)与环境构成的系统。与传统的森林或草地生态系统相比较,城市生态系统具有人类影响主导、结构复杂、空间异质性高、生物种类和群落种类多样、社会经济驱动强烈等特点。

城市生态系统首先被认为是一个高度复杂的社会—经济—自然复合生态系统,由社会子系统、经济子系

统和自然子系统复合而成^[6,11]。从驱动力上,城市生态系统不但受到自然因素的影响和控制,而且受到社会经济因素的影响和控制,人类对城市结构和布局的规划决定了城市生态系统的基本空间格局。从动态变化上,在人类高强度的能流物流驱动下,城市生态系统的结构和功能变化速度很快。

城市作为一个客观存在的地域单元,具有密集的人口及人类活动,有大量的人类构筑物,与周边农村地区或自然区域存在多方面的差异。这种差异形成了城市生态系统的边界。尽管水、土、气、生因子构成了城市生态系统的主要组分,但由于高强度的人类活动,城市的水土气生性质和功能已经发生了很大变化。传统的水土气生研究理论需要扩展,例如,城市生态系统研究需要新的水土气生分类体系(例如城市土壤分类、城市植被分类)和新的水土气生过程规律(如城市水文学)描述方法。这也为相关的水土气生研究学科提供了新的学科生长点。

生态系统概念提出 70 多年来,不但推动了生态学发展,而且极大的推动了生态学的应用。生态系统理论和方法在指导自然资源管理、生物多样性保护、生态环境保护、全球变化应对等政策措施制定方面,发挥了很大作用。将城市作为一种生态系统来研究,不但能够提高人类对城市中生物与环境关系(城市生态学)的认识,而且能够为应对城市生态环境问题(如热岛效应、洪涝灾害和人居环境质量下降等)提供各种解决方案。将城市作为一个生态系统研究,还与城市内部空间和组分的不可分性有关。人类为了生产和生活需要,在城市建设过程中,会将城市内部划分成不同的功能单元布置不同的活动,共同构成了一个整体城市。任何一个单元都只是城市这个生态系统的一部分。这不同于传统的自然生态系统,在森林或草原中,我们可以选择一个典型片段进行研究,探讨整个森林或草原生态系统的结构和功能。但城市内部任何一个功能单元(或片段)都只是整个城市生态系统的一个部分,并不能代表整个城市生态系统。城市生态系统内部各部分联系紧密,很难分离,相互作用共同构成一个整体,为城市的人们生存和发展提供必要的生活环境、生产条件和发展空间。因此,城市生态系统研究,需要考虑城市内部各种功能单元。

1.1 黑箱范式

在系统科学研究中,经常将结构复杂的系统作为一个黑箱,通过分析输入与输出间的响应关系,就可以知道如何管理控制一个系统,使其产生人类所需要的功能。城市生态系统,需要消费大量的能源和材料^[12],需要有大量能量和物质的输入和输出。如果将城市生态系统作为一个黑箱看待,不考虑其内部的复杂结构,只需要研究其能量物质的输入输出特征,就可以直接评价城市的资源需求、环境影响和生态效率。

在 1965 年, Wolman^[13]就提出了城市代谢概念,即通过定量城市的输入(如水、原料和燃料)和输出(如排泄物、固体废物和空气污染物)物质及其转化和流动,就可以分析评价城市和社区特征。通过分析城市,与能量资源消费、生产增长和废弃物排放紧密相关的技术和社会经济过程^[14],研究城市的能量、水、养分、产品和废弃物输入、输出和贮存,探讨物资和能量消费与社会经济驱动力的关系^[15-16]。并采用合适的工具和指标,建立起城市代谢模型,以探索城市资源利用效率和生产力提高的优化途径,辨识城市可持续发展的关键过程和改进机会。

为了评价城市对土地利用、水资源和气候的影响,有时会采取更简单的城市生态系统输入输出量评价指标。如生态足迹指标(人类消费和废物处理需要的土地面积^[17])被较早应用到城市对环境影响评价中。该指标又演化成水足迹、食物足迹、废弃物足迹、碳足迹,都已经被应用到城市生态影响的评价中^[18-20]。

黑箱范式虽然不能反映城市生态系统能量流动和物质循环过程的详细特征,但对城市管理来说,该范式简单直接,而且其结果容易理解和应用。

1.2 结构-过程-功能-服务级联范式

生态系统的研究,首先是从研究生态系统中的生物与环境的结构关系^[9]开始,逐渐发展到研究生态系统中的物质能量流动过程和功能(营养级^[21]、有机质分解^[22]、生产力^[23]),然后到研究生态系统服务^[24]。要完整理解一个生态系统,就需要从生态系统结构-过程-功能-服务全方面开展研究^[25-26],这就构成了生态系统的一种研究范式,即生态系统结构-过程-功能-服务之间具有逐级关联关系,即生态系统级联范式。

城市作为一个生态系统,需要开展从城市生态系统结构到生态系统服务的全面研究^[27],即采用生态系统结构-过程-功能-服务的生态系统级联范式来描述分析(图1)。城市生态系统结构、过程、功能和服务的主要特征:

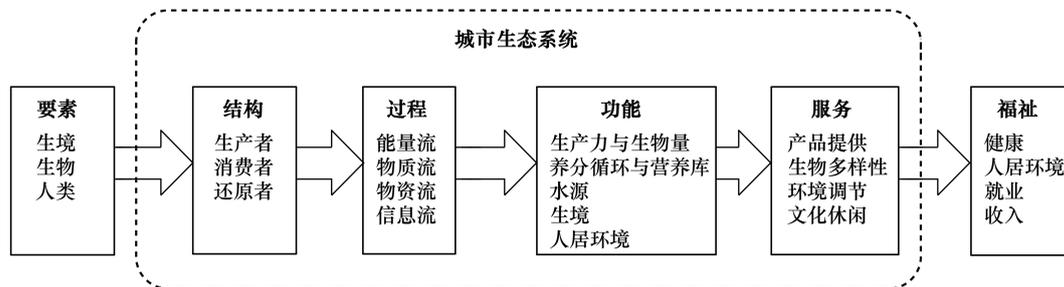


图1 城市生态系统结构-过程-功能-服务级联框架

Fig.1 Urban ecosystem structure-process-function-service cascade framework

(1)结构特征:生产者-消费者-还原者构成了生态系统能量传输和物质循环的完整过程。在城市生态系统中,人类占据了主导地位。人类作为城市的主要消费者,需要大量的生产者提供食物和能源,包括外来生产者提供食物和能源。需要高效的还原者分解废弃物,包括建设污水处理厂和垃圾焚烧炉。

(2)过程特征:生态系统功能维持需要连续不断的能量流、物质流和信息流。城市中各种人工建造和调控措施决定了能源和物质的输送转化过程,改变了自然界生物地球化学循环过程和物质生产过程^[28]。在城市生态系统中,参与能量流和物质流的物质形态多种多样。除太阳能外,化石能源和其他外来能源是主要能源;建筑材料、生活用品和食品是主要物质输送形态(可以称为物资流)。为了维持城市生产生活,城市中建设了多种人工运输设施(如道路、管道和输电线路等)和工具(如机动车等),用于物质和能量的输送,极大地增强了能量流和物质流的通量。城市生态系统的能量和物质流动的方式和方向主要是由社会经济目的决定的。城市生态系统具有高度的对外依赖性,需要大量外部的物质能量输入才能够维持。信息流已经在城市生态系统中变得越来越发达和重要,人类通过生产、收集、传输和解译各种信息,能够提高能量流和物质流的效率,增强城市生态系统功能和服务。

(3)功能特征:生态系统的基本功能主要有生产力与生物量、养分循环与营养库、水源和生境。在城市生态系统中,由于植被等自然地表的减少,会造成生产力与生物量、养分循环与营养库、水源和自然生境的减少。但城市高密度的人口和高效率的经济社会活动,不但能够保证人类的能量和营养需求,而且能够为城市提供优质的生活质量等功能,部分弥补了城市生态系统中自然功能的不足。

(4)服务特征:对人类来说,生态系统能够提供产品、调节和文化等多种服务。由于城市植被减少和城市社会经济功能需要,城市生态系统提供的服务种类和数量都发生了变化,提供的产品以加工过的食物和各种生活用品为主,提供调节功能的方式以各种人工环境调节和净化设施(如空调、污水和垃圾处理等)为主,提供文化服务的种类更加多样和强大,包括各种学校、医院和政府等。城市居民最关心的生态系统服务是降温、洪涝灾害减轻和人体健康保障等^[28-29]。

生态系统的结构、过程、功能和服务不是相互孤立存在的,而是关联的。系统的结构决定过程、过程决定功能、功能决定其影响(服务),具有逐级关联关系和先后依赖关系,即级联效应(Cascade effect)。系统结构的变化可以通过这种级联效应传递到服务的变化。近些年来,在生态系统评价中,生态系统的结构、过程、功能和服务间的级联效应已经得到广泛应用^[26]。对于城市生态系统,这种级联效应也存在。由于城市生态系统的复杂性,这种级联效应不是简单线性或唯一函数关系。但无论如何,理解这种级联效应对研究城市生态系统的结构和过程调控以及功能和服务提升具有重要科学价值。特别是在城市生态系统中,级联效应贯穿着强大的人为调控作用,包括人类可以为了获得需要的服务而改变生态系统结构和过程,通过各种政策和措施将

这种单向的级联关系改变成具有回路的循环反馈的网络关系。级联效应能够很好的反映城市生态系统服务的形成机制,解释城市生态系统内在联系和指导城市规划管理者制定生态系统服务提升措施和对策,但相应的实例研究目前还很少^[30]。

2 城市是人与自然复合的生态系统

人口地域上的聚集形成了城市。城市与一般居民点或村落的区别主要体现在:城市人口需要城市以外区域提供食物、水资源和其他生活物资来支撑,而且城市生活消费排放的废弃物量已经超过了城市生态系统自身代谢还原能力,需要输出到城市以外区域或采用人工设施(如污水处理场和垃圾焚烧厂)来消化,才能保证城市环境不被破坏。尽管城市离不开自身的自然环境条件,但从城市生态系统的要素、结构、过程、功能到服务,城市处处表现出以人为主导的复合生态系统特点。

人与自然关系一直是生态学研究热点之一。人类为了满足自身发展和完善的需要,对自然进行不断的改造和开发利用,但人类是自然界的产物,不可能离开自然而生存。没有自然界提供优质水源、清洁空气和足够食物,人类就不可能生存。并且,自然的资源提供能力和循环再生能力都是有限的,即人类生存的资源环境承载力是有限的。过分开开发和利用自然是不可能持续的,甚至会造成人类的灾难。从局部地区人类活动引起的滑坡、泥石流和洪涝,到全球范围内人类活动引起的气候变化,许多案例都反映了人类活动可以造成威胁人类生存和发展的灾难性后果。幸运的是,人类社会发展和技术进步,有可能通过提高资源利用效率和环境净化能力,减少人类活动对自然环境影响和破坏,从而减少自然灾害和提高人类生活质量。因此,人类社会实现可持续发展的根本就是要解决好人与自然共存并和谐相处。

城市形成和发展过程中,尽管人类起到了主导作用,但人与自然在城市生态系统中都具有重要作用,缺一不可。人与自然的相互作用决定了城市生态系统的结构、过程和功能特征。

2.1 城市生态系统中人与自然的作用

城市是人类社会经济活动的产物,人类在整个城市生态系统中发挥着主导作用。但自然作为城市形成和发展的物质基础,其作用不可忽视。现在城市面临的许多生态环境问题都与忽视自然的作用有关。如城市热岛效应和洪涝灾害都与自然植被大量减少有关。在城市生态系统中,人和自然都是重要的组分,都在发挥着重要作用,共同维持和调控各种生态过程和功能,为城市生活的人们提供各种服务。充分认识人和自然在城市生态系统中的作用,对理解城市生态系统特征和开展城市规划与管理具有重要意义。

在以前研究中,城市生态系统被分为自然、社会和经济三个子系统^[6],并且认为三个子系统相互作用和关联。但对于三个子系统各自的作用及其相互间如何关联,研究还比较少。为了将问题简单化,这里将社会和经济子系统都归并成人类及其活动。这样就可以将城市生态系统的组分分成人和自然两大类,然后分析自然和人类在生态系统组分、结构、过程、功能和服务等方面的各自作用(表1)。可以总结如下:

(1)城市生态系统组分中,除水、土、气、生等自然因子外,还有一些人工组分,如人工构筑物(如道路、管道、房屋和广场等)。

(2)城市生态系统结构中的生产者、消费者和还原者,既包括自然界的光合作用产生有机物的植物(生产者)、采食植物和捕食其他动物的动物(消费者),以及分解植物和动物残体的微生物(还原者),还包括人类社会的食品加工及能源和其他原材料生产的生产者,饮食交通娱乐等的消费者,以及各种废弃物处理的还原者。人类可以同时承担生产者、消费者和还原者的角色。

(3)城市生态系统过程,自然界主要依靠风场、河流、土壤发育和生物生长以及食物链进行能量和物质的流动,人类通过各种交通运输和通信,进行能量、物质、物资和信息的传递。

(4)城市生态系统功能,自然界包括维持空气和水体质量、提供水资源和生产力、维持各种能量流动与养分循环等,人类活动包括供应日常用品、维持环境、提供各种基础设施,以满足人类生活生产和文化需求。

(5)城市生态系统服务,自然和人类都能够提供,包括提供产品、调节、文化等服务。对于城市特别关心

的固碳、温室气体减排、热岛效应缓解、暴雨径流减缓、水质改善、空气质量改善、人体健康等服务^[28,31],人和自然既可以分别完成,也可以共同协作实现。

表 1 人与自然在城市生态系统的基本组分、结构、过程、功能和服务的作用

Table 1 The roles of human and nature in the basic components, structure, process, function and service of urban ecosystem

项目 Items	自然 Nature	人类 Human	相互作用机制 Interaction mechanism
组分 Component	空气、水体、土壤、生物	道路、建筑物、管道、输电线路	镶嵌
结构 Structure	生产者 植物有机物生产	能源生产、食物生产、工业生产、文化、服务业、基础设施建设	融合
	消费者 食草动物和食肉动物	饮食、取暖和制冷、交通、娱乐	
	还原者 微生物分解	垃圾焚烧、废气净化、污水处理	
过程 Process	空气流动、河水流动、土壤形成、生物生长、食物链	运输、通信	耦合
功能 Function	空气质量、水资源、水体质量、生产力、能量流动、养分循环	产品生产、环境净化、教育卫生	互补
服务 Service	产品、调节、文化	产品、调节、文化	协同

2.2 城市生态系统人与自然的相互作用机制

人类是城市生态系统的主角,人类主导的社会经济活动对城市形成和发展具有决定性作用。但自然界在提供城市生产生活条件方面也具有重要作用和优势,因此在城市生态系统中,自然和人类会承担不同角色,共同发挥作用,表现在生态系统组分上镶嵌、结构上融合、过程上耦合、功能上互补和服务上协同(表 1),以保障城市生态系统健康可持续发展。

(1)组分上镶嵌:城市生态系统组成元素可以分为人工构筑物 and 自然要素。前者包括人工建造的各种建筑物(房屋、道路、广场等),基本上是自然界不存在或很少有的。后者是自然形成的各种植被、湖泊和岩石等。在城市空间上,两类元素常常镶嵌分布。这种组分镶嵌特征,将会直接影响城市生态系统的结构、过程、功能和服务。

(2)结构上融合:生态系统从结构上是由生产者、消费者和分解者组成,三者构成了生态系统的食物链,维持了生态系统能量流动和物质循环过程的正常工作。为了满足人类物质和精神生活的高度需求,城市生态系统中的能量和物质流动的通量很大,自然界的生产者、消费者和分解者的能力已经不能满足需求,而必须依靠人工建立的基础设施(如化石能源生产消费、废弃物处理等),融合各种自然要素,共同来完成城市生态系统的有机物生产、消费和分解活动,以保证城市生态系统功能的正常发挥和城市效率的提高。

(3)过程上耦合:城市生态系统既包括依靠自然力驱动的自然过程,也需要依靠社会经济力驱动的人类过程。这两种过程并不仅仅单独运动,而且常常相互耦合在一起,共同完成城市生态系统的能量流动和物质循环。城市除自然的能量流动和物质循环外,大量能量和物质需要人类外部输入和内部转运,被利用后会排入人工废弃物处理系统(如垃圾焚烧厂和污水处理场等),最后回归自然,融入自然界参与自然物质循环。只有将人类社会物质代谢过程和自然物质循环相耦合,才能科学的根治各种城市生态环境问题。

(4)功能上互补:城市生态系统中,自然界具有的生产功能和养分循环功能,往往只能满足城市社会经济的部分需要,更多的需要由人工设施的功能来满足。如城市的食物和能源供给功能、居住功能、教育卫生功能等,除少量依靠自然环境外,主要是依靠人类从外地输入或自行修建,补充自然生态系统功能上的不足,共同满足城市人类生产生活的功能需求。

(5)服务上协同:城市需要足够的食物、饮用水和能源、良好的空气和水体环境以及充足的文化生活等服务。由于物理化学和生物学性质不同,自然界和人工设施在提供不同服务时的成本和效率不一样,因此,应该优化配置自然和人类要素,利用自然和人类提供的生态系统服务的互补和协同关系,减少城市面临的生态环

境问题。

在城市生态系统中,人与自然的关系既可以是竞争的,也可以是互补的。一块土地要么开发为人工设施,要么保留自然景观,人与自然相互竞争。特别是在城市处于快速发展时期,城市土地的社会经济价值不断提升,造成人工建筑用地扩大,自然用地减少,结果造成了生物多样性和生态系统服务的下降以及人居环境质量的恶化。人类对城市生产生活的需求是多方面的,一部分是自然能够提供的,而一些需要人类自己解决。如城市的废弃物分解,尽管自然界具有一定的环境净化能力,但面对城市巨量的废弃物,远远超过了自然界的净化能力,需要人工建立垃圾焚烧、污水处理等设施来降解废弃物。在城市规划和建设中,应该努力减少城市生态系统中人与自然间存在的竞争关系,充分发挥人与自然间的互补与协同关系,才能保证人与自然和谐相处,促进城市可持续发展。

2.3 人与自然共存进化范式

随着人类活动范围和影响的不断扩大,生态学正在从探讨纯自然的生态系统(原始森林和草原)发展到研究受人类影响的生态系统,如农田、城市生态系统等。在全球范围内,目前几乎不存在严格意义的不受人类活动影响的生态系统。即使南极北极和高寒山地,也受到气候变化和远程传输过来污染物的影响。因此,越来越多的生态学家将人类活动纳入到生态系统研究中,探讨生态系统动态及其受人类活动的影响,探寻人类与自然和谐相处的可持续发展途径。

我国古代就有人地合一的观念。30年前,马世骏和王如松^[32]提出了社会-经济-自然复合生态系统理论,指出生态系统是由自然、经济、社会三个子系统构成的,具有整体、协调、循环、共生的特性。刘建国等^[33]提出了人与自然耦合系统概念,指出了人和自然在空间、时间和组织单元上耦合,该耦合系统具有阈值、交互反馈、时滞、弹性、异质性和意外性等特点。著名经济学家 Ostrom^[34]提出了社会-生态系统概念,认为资源的使用者从来不会有效地保护资源,除非政府强制要求。越来越多的实践证明,只有同时考虑人类和自然两方面及其相互作用,人类才能理解社会发展和生态系统动态,才能走上社会经济可持续发展道路。越来越多的人认为,人类是生态系统的组成部分,生态系统中的人类和自然环境组分深深的交织在一起,相互影响^[35]。

城市作为人类社会发展的产物,城市学家早期主要关心城市的社会经济性质和问题^[36]。随着城市人口进一步聚集和各种生态环境问题的集中爆发,生态学家重新关注城市中自然组分的重要性。早在1980年代,我国开始城市生态系统研究时,马世骏和王如松^[32]提出“城市是一类以人类的技术和社会行为为主导,生态过程为纽带,人与自然环境相互作用形成的社会-经济-自然复合生态系统”,就强调城市是一类以人的行为为主导、自然环境为依托、资源流动为命脉、社会体制为经络的人工生态系统^[6]。自2000年以来,国外城市生态系统研究的理论框架中,也强调人与自然的相互关系。在美国凤凰城研究中,Grimm和Redman^[37]提出城市中人类活动和生态系统的耦合框架,强调研究城市生态系统格局和过程动态及其受人类活动和环境变化的影响。Pickett等^[38]提出城市是由社会系统和与生态系统结构-过程相关联的资源系统构成的人类-自然耦合系统。Alberti等^[39]更强调了人类和自然的结合,生态系统驱动力、格局、过程和效应的研究应该包含人类社会和自然特征及其相互杂交(hybrid)。总之,这些研究都是从静态角度分析人与自然关系的。我们知道,城市作为一种社会发展现象,是在不断发展变化的,具有一种动态变化过程。因此,有必要从进化的角度来分析一下城市生态系统的人与自然相互关系。

人类社会的发展历史,就是一部人与自然共同进化的历史。地球上生物的出现,逐步改变了地球上的气候、水文和土地覆盖特性,形成了各种新的生境条件,促进了新的生物出现。地球上的自然环境与生物相互作用、共同进化。正如盖亚假设指出的,生物与环境的相互作用形成的协同、自我调节和复杂的系统,维持了地球上适合生命持续生存与发展的条件^[40]。人类出现和壮大,越来越深刻地改变地球面貌和过程,形成了人类世^[41-42]。在人类世,人与自然的关系还在不断变化。特别是随着人类向城市聚集,城市化进一步加剧了人类对地球的影响。城市建设,人类利用各种先进技术对自然环境进行重新构造,改变了城市区域的自然地理面貌和地球物理化学过程。随着全球城市数量和规模的不断扩大,城市将成为我们所处的星球演化过程中的一

种重要现象,地球将会很快进入城市世(Urbanoecene)。在城市世,城市将成为主导人类和地球演化的核心,人类和地球的未来命运都将与城市的发展密切相关。城市既是人类社会发展的产物,也是地球演化的产物。任何城市都是由自然和人类两种要素构成的。城市的维持和发展,需要自然过程和人类社会过程共同支撑,同时伴随着人与自然的共同发展^[43]。可以说,城市是一种人与自然共存进化的产物。人类发展,推动了城市发展,自然条件为城市发展提供了自然基础。城市发展改变了人类,也改变了自然,改变了人与自然的关系。城市发展可以引起一系列生态环境问题,如资源短缺、污染严重和生活质量下降,但人类通过建立新的社会、经济和技术系统,耦合人与自然因素和过程,可以防止生态环境问题的出现,建立一种人与自然的和谐关系,保障人类社会高效持续发展。城市发展将会改变地球的自然进化史,但这一定是建立在人与自然共存进化的基础上。

人与自然共存进化范式,反映了城市生态系统研究的核心。城市是人与自然共同构成的复合生态系统,你中有我、我中有你。人与自然相互作用形成了一个协同、自我调节和复杂的城市生态系统,维持着城市居民的生活生产及城市发展。人类为了适应城市生活,在不断进行城市建设和改变自身的行为。城市植物和动物为了适应城市环境,也会产生生长发育变化和生活行为适应。人类不仅是城市生态系统发展演变的影响因素,而且是城市生态系统中的一个重要组分。人类自身及其建造的各种设施,已经成为城市生态系统不可或缺的组分,直接参与了、甚至主导了城市生态系统的一些重要过程和功能。自然仍然是城市生态系统的重要组成部分,城市气候、水文、地形、植被、土壤等自然要素,对城市居民生活质量和城市生态环境具有重要调控作用。因此,城市生态系统中,自然要素和人类要素是共存的,共同维持城市生态系统的过程和功能。人类和自然通过不断的相互作用、相互影响和相互适应,塑造了一定结构和功能的城市生态系统,为人类生存和发展提供生活生产条件。在城市生态系统中,人与自然不但具有各自的角色和发挥不同的作用,而且在许多方面是紧密的融合在一起的,共同塑造了城市生态系统的形态及能流和物流特征,形成了城市生态系统的自然-人工复合格局、社会-生物-地球-化学循环耦合过程和生产-生活复合功能。人类推动了城市发展,进而影响到城市自然环境,如地貌改变、热岛效应、环境污染、植被变化等,甚至可以改变城市生物的进化过程^[44]。人类起源于自然,需要自然界持续地提供基本生活生产资源和条件,城市对自然环境的改变,有可能影响到自然资源供给能力和条件,人类社会必然需要做出相应的改变。为了减缓和适应城市自然环境的改变,生活在城市的人类不得不改变其生产生活方式,甚至改变人类社会行为的进化过程。在城市生态系统中,人和自然不但需要共存,而且会发生共同进化,即人与自然共存进化。对于城市生态环境问题来说,人与自然共存进化,既是其产生的根源,也是其根除的良方。城市生态人与自然共存进化,调控着城市的形成和发展,决定了城市生态系统的演化非线性、空间异质性以及稳定性和弹性。因此认识人与自然共存进化规律,应该是今后城市生态学的研究重要内容。

3 结论

城市作为一个人与自然复合的复杂生态系统,可以采用黑箱范式、生态系统结构-过程-功能-服务级联范式和人与自然共同进化范式开展研究。城市生态系统在研究方法和内容上,与传统的森林、草原和农田生态系统存在很大不同。首先城市能量物质流动集中发生在人类社会,主要为城市物质代谢。其次,城市生态系统的结构、过程、功能和服务的类型和数量都明显增多,特别是包括许多社会经济因素和途径。再次,城市生态系统是人与自然复合成的一个整体,表现在人与自然因素在组分上镶嵌、结构上融合、过程上耦合、功能上互补和服务上协同。人类不仅仅是城市生态系统的驱动力或受影响者,而具有多种角色:生产者、消费者、还原者、建设者、管理者、接受者和响应者等。人类需要很好地协调城市生态系统人与自然之间的各层次上的关系,才能够保证城市具有良好的人居环境质量和高效的生活生产方式。

在如今快速城市化发展时期,城市面临的热岛效应、洪涝灾害和疾病风险等“城市病”还在不断加重。这些问题的起源与传统城市建设中缺乏对城市生态系统的全面了解有关。例如忽视城市生态系统中的自然环

境的作用和价值,造成植被缺乏和地表过分人工化,降低了城市生态系统的气候和水文调节服务功能,容易形成气温升高和暴雨积水。城市也需要强大的人工设施,如果没有可靠的供水供电系统、足够有效的污水和垃圾处理系统,城市生态系统就很难良性循环,人居环境质量就无法保证。在城市生态系统中,人与自然应该共存、互惠共生、发挥各自长处,才能提升城市生态系统总体服务功能,保证城市生态系统健康和活力。城市是人类社会发展形成的,人类活动影响巨大,但不能简单认为城市是一种以人为核心的生态系统,而应该将城市看成人与自然复合的生态系统。人与自然共存进化,是城市形成的重要动力。城市发展改变了自然和改变了人类,人类也会采用各种社会、经济和技术手段,进行城市规划、建设和管理,保证城市生态系统的健康和活力。将城市作为一个完整的生态系统,分别采用黑箱范式、结构-过程-功能-服务级联范式和人与自然共存进化范式,系统研究城市生态系统的物质能量输入输出关系、结构-过程-功能-服务间级联关系以及人与自然协同关系,将为辨识城市生态环境问题、探索城市人居环境质量提高的技术途径和制定城市社会经济发展政策提供科学依据,从而增强城市生态系统的弹性和可持续性。

参考文献 (References):

- [1] Doherty M, Meyers J, Beaty M. Measuring and Monitoring Urban Ecological Function in Canberra Report 1: Defining, Measuring and Monitoring Urban Ecosystem Processes and Urban Ecosystem Services: A Review and Pilot Spatial Analysis Methodology. 2009.
- [2] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2015) The Integration of Immigrants into American Society. Washington, DC: The National Academies Press. 458 pages. Boeskor A, Hunyadi M, Vince D. Intersections: East European Journal of Society and Politics, 2017, 3 (3): 157-161.
- [3] Acuto M. Global science for city policy. Science, 2018, 359(6372): 165-166.
- [4] Sukopp H, Weiler S. Biotope mapping and nature conservation strategies in urban areas of the Federal Republic of Germany. Landscape and Urban Planning, 1988, 15(1/2): 39-58.
- [5] 宋永昌, 由文辉, 王祥荣. 城市生态学. 上海: 华东师范大学出版社, 2000.
- [6] 王如松. 高效·和谐: 城市生态调控原则和方法. 长沙: 湖南教育出版社, 1988.
- [7] Pickett S T A, Cadenasso M L, Childers D L, McDonnell M J, Zhou W Q. Evolution and future of urban ecological science: ecology in, of, and for the city. Ecosystem Health and Sustainability, 2016, 2(7): e01229.
- [8] Kuhn T S. The Structure of Scientific Revolutions. Chicago: University of Chicago Press, 1962.
- [9] Tansley A G. The use and abuse of vegetational concepts and terms. Ecology, 1935, 16(3): 284-307.
- [10] Chapin III F S, Matson P A, Mooney H A. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. New York: Springer, 2011.
- [11] 王如松. 转型期城市生态学前沿研究进展. 生态学报, 2000, 20(5): 830-840.
- [12] Odum E P. Ecology: A Bridge Between Science and Society. 3rd ed. Sunderland, Mass: Sinauer Associates Incorporated, 1997.
- [13] Wolman A. The metabolism of cities. Scientific American, 1965, 213: 179-190.
- [14] Kennedy C, Cuddihy J, Engel-Yan J. The changing metabolism of cities. Journal of Industrial Ecology, 2007, 11(2): 43-59.
- [15] Niza S, Rosado L, Ferrão P. Urban metabolism: methodological advances in urban material flow accounting based on the lisbon case study. Journal of Industrial Ecology, 2009, 13(3): 384-405.
- [16] Rosado L, Niza S, Ferrão P. A material flow accounting case study of the lisbon metropolitan area using the urban metabolism analyst model. Journal of Industrial Ecology, 2014, 18(1): 84-101.
- [17] Rees W, Wackernagel M. Urban ecological footprints: why cities cannot be sustainable—and why they are a key to sustainability. Environmental Impact Assessment Review, 1996, 16(4/6): 223-248.
- [18] Luck M A, Jenerette G D, Wu J G, Grimm N B. The urban funnel model and the spatially heterogeneous ecological footprint. Ecosystems, 2001, 4 (8): 782-796.
- [19] 吴燕, 王效科, 逯非. 北京市居民食物消费碳足迹. 生态学报, 2012, 32(5): 1570-1577.
- [20] 吴燕, 王效科, 逯非. 北京市居民食物消耗生态足迹和水足迹. 资源科学, 2011, 33(6): 1145-1152.
- [21] Lindeman R L. The trophic-dynamic aspect of ecology. Ecology, 1942, 23(4): 399-418.
- [22] Melillo J M, Aber J D, Muratore J F. Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. Ecology, 1982, 63(3): 621-626.
- [23] Shaver G R, Chapin III F S. Effect of fertilizer on production and biomass of tussock tundra, Alaska, U.S.A. Arctic and Alpine Research, 1986, 18(3): 261-268.

- [24] Daily G C. *Nature's Services Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington, DC: Island, 1997.
- [25] de Groot R S, Wilson M A, Boumans R M J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 2002, 41(3): 393-408.
- [26] de Groot R S, Fisher B, Christie M, Aronson J, Braat L, Haines-Young R, Gowdy J, Maltby E, Neuville A, Polasky S. Integrating the ecological and economic dimensions in biodiversity and ecosystem service valuation//Kumar P. *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and Economic Foundations*. London: Earthscan, 2010.
- [27] Endlicher W. Introduction; From Urban Nature Studies to Ecosystem Services//Endlicher W, ed. *Perspectives in Urban Ecology: Ecosystems and Interactions between Humans and Nature in the Metropolis of Berlin*. Berlin Heidelberg: Springer, 2011.
- [28] Pataki D E, McCarthy H R, Litvak E, Pincell S. Transpiration of urban forests in the Los Angeles metropolitan area. *Ecological Applications*, 2011, 21(3): 661-677.
- [29] Nowak D J, Hirabayashi S, Bodine A, Greenfield E. Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. *Environmental Pollution*, 2014, 193: 119-129.
- [30] Luederitz C, Brink E, Gralla F, Hermelingmeier V, Meyer M, Niven L, Panzer L, Partelow S, Rau A L, Sasaki R, Abson D J, Lang D J, Wamsler C, von Wehrden H. A review of urban ecosystem services: six key challenges for future research. *Ecosystem Services*, 2015, 14: 98-112.
- [31] Gómez-Baggethun E, Gren Å, Barton D N, Langemeyer J, McPhearson T, O'Farrell P, Andersson E, Hamstead Z, Kremer P. Urban Ecosystem Services//Elmqvist T, Fragkias M, Goodness J, Güneralp B, Marcotullio P J, McDonald R I, Parnell S, Schewenius M, Sendstad M, Seto K C, Wilkinson C, eds. *Urbanization, Biodiversity and Ecosystem Services: Challenges and Opportunities: A Global Assessment*. Dordrecht: Springer, 2013.
- [32] 马世骏, 王如松. 社会-经济-自然复合生态系统. *生态学报*, 1984, 4(1): 1-9.
- [33] 刘建国, Dietz T, Carpenter S R, Folke C, Alberti M, Redman C L, Schneider S H, Ostrom E, Pell A N, Lubchenco J, Taylor W W, 欧阳志云, Deadman P, Kratz T, Provencher W, 张淑敏. 人类与自然耦合系统. *AMBIO-人类环境杂志*, 2007, 36(8): 602-611.
- [34] Ostrom E. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, 2009, 325(5939): 419-422.
- [35] Niemela J, Breuste J H, Elmqvist T, Guntenspergen G, James P, McIntyre N E. *Urban Ecology: Patterns, Processes, and Applications*. New York: Oxford University Press, 2011.
- [36] Park R, Burgess E W, McKenzie R D. *The City: Suggestions for the Study of Human Nature in the Urban Environment*. Chicago: University of Chicago Press, 1984.
- [37] Grimm N B, Redman C L. Approaches to the study of urban ecosystems: the case of Central Arizona—Phoenix. *Urban Ecosystems*, 2004, 7(3): 199-213.
- [38] Pickett S T A, Cadenasso M L, Grove J M. Biocomplexity in coupled natural-human systems: a multidimensional framework. *Ecosystems*, 2005, 8(3): 225-232.
- [39] Alberti M, Marzluff J M, Shulenberger E, Bradley G, Ryan C, Zumbrunnen C. Integrating humans into ecology: opportunities and challenges for studying urban ecosystems. *Bioscience*, 2003, 53(12): 1169-1179.
- [40] Lovelock J E. Gaia as seen through the atmosphere. *Atmospheric Environment*, 1972, 6(8): 579-580.
- [41] Crutzen P J. Geology of mankind. *Nature*, 2002, 415(6867): 23.
- [42] Ellis E C, Ramankutty N. Putting people in the map: anthropogenic biomes of the world. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2008, 6(8): 439-447.
- [43] Alberti M. *Cities that Think Like Planets: Complexity, Resilience, and Innovation in Hybrid Ecosystems*. Washington: University of Washington Press, 2016.
- [44] Alberti M. Eco-evolutionary dynamics in an urbanizing planet. *Trends in Ecology & Evolution*, 2015, 30(2): 114-126.