

DOI: 10.5846/stxb201901300222

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.

Wang X K, Su Y B, Ren Y F, Zhang H X, Sun X, Ouyang Z Y. Urban ecosystem: highly spatial heterogeneity. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(15): 5103-5112.

城市生态系统: 高度空间异质性

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: 城市生态系统复杂性不但体现在人与自然复合关系上, 而且体现在空间异质性上。不同于传统的内部相对均质的生态系统, 城市生态系统的构成元素(建筑物、植被和水体)在类型、密度、人类干扰强度和社会经济生态功能等方面都存在着很大的空间差异, 形成了城市生态系统内部的高度空间异质性。城市空间异质性描述多采用以斑块为基础的景观格局指数法和斑块分类法等。城市生态系统的高度空间异质性, 表现在城乡梯度上, 生态系统要素、结构、过程、功能和服务都呈现出一定的城乡变化梯度。还表现在各类城市要素和功能单元的破碎化分布上, 形成了多层级的斑块化格局。因此, 城市空间异质性研究可以采用城乡梯度范式和层级斑块动态范式。这将为城市生态系统内部空间分异规律研究和城市规划管理提供重要的方法学基础。

关键词: 城市生态系统; 空间异质性; 城乡梯度; 层级斑块动态

Urban ecosystem: highly spatial heterogeneity

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: The complexity of urban ecosystem is not only reflected in the compounding relationship between human and nature, but also in their spatial heterogeneity. Different from the traditional ecosystems with internal relative homogeneity, the elements (such as buildings, vegetation and water bodies) making up urban ecosystem have great spatial variations in type, density, human disturbance intensity and socio-economic ecological function, resulting in the highly spatial heterogeneity within urban ecosystem. Urban spatial heterogeneity are generally analyzed by methodologies of landscape pattern index and patch classification method. Urban spatial heterogeneity is characterized by both the urban-rural gradient of component, structures, processes, functions and services of urban ecosystem, and the fragmentation of various urban units with different biophysical and social-economic properties, i.e., spatial patch pattern. So both paradigms of urban-rural gradient and hierarchical patch dynamic are proposed for investigating urban spatial heterogeneity. The study will provide an important methodological basis for the study of spatial heterogeneity within urban ecosystems and the guidance for urban planning and management.

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@rcees.ac.cn

Key Words: urban ecosystem; spatial heterogeneity; urban-rural gradients; hierarchical patch dynamic

城市作为一个完整的人与自然复合的生态系统,内部具有复杂的结构,特别是各种生态系统要素和功能在空间上存在很大变化。构成城市自然元素的建筑物、植被和水体,在类型、密度、人类干扰强度和社会经济生态功能等方面都存在很大的空间差异。在城市生态系统中,无论自然环境要素,如地形、水文、温度、水分等,还是生物要素,如植物、动物、植被种类、生产力等,或者社会因素,如人口、工业、商业、居民区等,都具有空间异质性^[1-2]。城市规划就是要将各种建筑物、植被及人类活动配置在城市内部不同的地点,通过高度异质性的空间结构设计,来为人类长期发展提供适宜高效的生活生产环境。因此,空间异质性是城市生态系统的主要特征。

城市空间异质性是指城市内部的各种生态系统要素和功能在空间分布上的不均匀性及其复杂性。国内外已经开展了大量城市空间异质性的研究^[1-2]。例如土壤养分和重金属元素含量沿市中心向郊区的梯度变化^[3];植被类型在城市高中低收入的三类社区具有明显差异^[4];城市热岛效应强度空间差异与植被斑块空间配置有关^[5]。空间异质性既是影响城市生态系统变化的原因或驱动力,也是城市生态系统变化的结果,不但对城市生态系统的过程、功能和服务具有决定性作用^[2,6-8],而且反映了各种城市生态系统结构和功能变化的后果。因此,城市空间异质性是城市生态系统研究的核心问题之一。城市建设,无论建造一栋房子,还是修建一座桥,都是对城市空间异质性的重新构建。这种重构不但影响建设单元的社会经济生态功能,而且还会改变整个城市的社会经济生态功能。因此,城市空间异质性也是城市规划者和管理者的关注重点之一。

1 城市空间异质性描述方法

空间异质性反映的是研究对象及其属性的空间变化^[9-11]。其描述与研究的问题密切相关^[12],但大多采用斑块组成和结构的复杂性来描述^[13]。斑块是构成空间对象的组成单元,也是描述空间变异的基础单元,斑块配置(Patch array or configuration)描述是空间异质性分析的重要内容。从斑块配置的角度,城市空间异质性描述表征可以采用景观指数法和斑块分类法。

1.1 景观指数法

作为研究空间异质性的重要学科,景观生态学发展了一系列简单定量指数,即景观格局指数,用来描述斑块特征及其空间配置。景观格局指数种类很多,有描述斑块形状的、斑块镶嵌多样性的、斑块变化特征的等。广泛应用的景观格局指数计算模型 Fragstats(美国俄勒冈州立大学开发)能够计算的景观指数达到 66 个。景观格局指数已经被广泛应用到分析城市生态系统的空间异质性及其生态效应。Luck 和 Wu^[14]采用了 6 个景观格局指数(斑块丰富度、斑块类型面积占比、最大斑块指数、斑块密度、斑块平均大小及变异系数、景观形状指数、面积加权平均形状指数),研究美国凤凰城空间异质性在不同土地利用类型间的差异和沿城乡梯度的变化。随后,许多研究采用了景观格局指数分析城市生态系统格局演变^[15-17]。近些年来,大量研究分析了城市景观格局指数与城市热岛^[5,18-20]的关系,以揭示城市景观结构和绿地空间布局对热岛效应的调控作用。

1.2 斑块分类法

分类作为一种重要的科学研究手段,将特性相同或相似的对象划分成一类,以便对同类对象进行研究、比较和管理。为了刻画、表征和分析城市生态系统空间异质性,许多研究对构成城市生态系统的斑块进行分类。一般有两类方法,一是按照生态单要素进行分类,如城市土壤分类、城市水系分类等,或按城市管理要求的城市行政区划分类等。这种单一性质的分类不在本文进行详细讨论。二是基于多要素综合或生态功能的分类,确定城市内部空间同质性单元类型(斑块),如生境(或土地覆盖)、土地利用、绿地、植被等,对城市生态系统进行调查分析(表 1)。最常见的城市综合分类方法包括:(1)土地覆盖类型:主要关注自然性质,如按水文性质将土地覆盖划分为透水和不透水类型、面向城市景观和环境系统的高精度生态分类(HERCULES)将城市生境分为建筑、裸地和植被^[31]。(2)土地利用类型,主要体现城市单元的社会经济功能,如按照城市斑块的用

途划分为居住区、工业区和商业区等。如城市形态分类。(3) 绿地类型:主要考虑各种绿地的建设目的和服务功能,如建设部的城市绿地分类;(4) 植被类型:主要依据城市植被起源和生物学特性,如蒋高明^[26]和 Forman^[27]等学者的城市植被方法。(5) 植被生境类型(Biotope):主要考虑斑块生物学特征,如欧洲生境制图。

表 1 城市生态系统空间斑块分类方法
Table 1 The classification methods of urban ecosystem spatial patch

分类对象 Classification objects	分类系统 Classification system	特点 Characteristic	应用城市 Cities	参考文献 References
土地覆盖 Land cover	2 类	按水文性质分为透水和不透水地表		
	3 大类及其组合	建筑、裸地、植被	巴尔的摩	Cadenasso 等 ^[21]
	9 类	建筑、其他不透水地表、林木、灌丛、草坪、高草、耕地、水体、裸地/砾石		Gill 等 ^[22]
	8 种土地覆盖和建筑高度类型及其组合	树冠、草地/灌丛、裸地、铺装地、水体、低层、中层和高层建筑	纽约、柏林	Larondelle 等 ^[23] 和 Hamstead 等 ^[24]
土地利用 Land use	7 类城市与建设用地	居住、商业或服务业、工业、交通通信公建、工商复合体、城市或建城区混合体、其他城市或建设用地		Anderson 等 ^[25]
	8 大类 35 种类 42 小类	大类分为居住用地、公共管理和公共服务用地、商业服务业设施用地、工业用地、物流仓储用地、道路和交通设施用地、公共设施用地、绿地广场用地等,中类按照使用目的和影响等划分,小类按照服务对象划分	中国	建设部(2010)
	13 类 29 亚类	大类按性质分为农田、林地、矿区、娱乐休闲、交通、服务设施、居住区、社区服务、零售、工业服务业、国防和未利用土地,亚类按质量、大小、服务对象等细分	Greater Manchester, UK	Gill 等 ^[22]
绿地 Green space	5 大类 16 中类 24 小类	大类按功能分为公园绿地、生产绿地、防护绿地、附属绿地和其他绿地,种类按服务或附属性质划分,小类按服务对象大小划分	中国	建设部(2002)
植被 Vegetation	3 类	自然、伴人和人工植被		蒋高明 ^[26]
	3 大类 2 中类 2 小类	大类为干旱、中等和湿润 3 类,中类为栽种和自生 2 类,小类分为人类管理和生态演替 2 类		Forman ^[27]
植被生境 Vegetation habitat	三级分类	依次考虑生境类型+植被类型(或生活型)+重要性(物种或功能价值)	德国、瑞典	Qiu 等 ^[28] 和 Sukopp 和 Weiler ^[29]
	四级分类	一级超类(人工构筑物、稀疏植被、林木灌丛、湿地草本、陆地草本),二级类根据基质材料或植物生活型划分,三级亚类根据有无植被或季相划分、四级根据生活型定量指标细分	Porto, Portugal	Farinha- Marques 等 ^[30]

针对不同的生态系统要素和研究目的,研究者可以采用不同的方法进行城市斑块类型的划分。但对于同类的城市生态系统要素和功能,如城市植被、城市土壤、城市社会单元等,建立相对规范统一的城市斑块划分方法非常必要。

城市空间异质性的描述分析,不仅可以采用城市斑块类型划分方法,而且还可以采用梯度分析和空间相关法,如 Imperato 等^[32]采用趋势面分析法研究城市土壤重金属的空间分析、Fan 和 Myint^[33]采用了 Moran 指数和 Getis 指数分析了美国凤凰城的植被指数的空间自相关性。梯度分析和空间相关分析能够模拟生态系统属性的连续分布规律,是城市生态系统属性的空间变化预测和空间影响因素分析的重要工具。

2 城市空间异质性研究范式

生态系统要素和功能属性的空间变化特征(即空间异质性),可以是空间连续的或空间不连续的,分别表

现为空间梯度分布和空间斑块分布。梯度分布强调生态特性的逐渐变化性质,而斑块分布强调斑块单元的空间分布与配置的关系。在城市生态系统中,空间异质性主要表现在城乡梯度差异和层级斑块动态特征。

2.1 城乡梯度范式

城市发展是一个逐步向外扩张的过程。在空间结构上形成了城市到乡村的逐渐过渡格局。早在 1826 年,杜能的农业区位论,即基于运输距离决定土地地租的理论,就提出了城市到乡村的同心圆结构理想模式。随着工业化的快速发展,工商业的规模效应不断提高了城市中心区的土地收益(或地价),迫使郊区低收益的农田逐步向外后退,形成了巨大的城乡梯度。一般城市中心区,高楼大厦林立,绿地稀少,人口密度高,各种生活服务设施优秀,而越远离城市,建筑物的高度降低,绿地面积增大。从市中心到郊区,人口密度、不透水地表比例、路网密度、交通流量等都有减少的趋势,从而造成了绿地分布、土壤性质、植被结构等生态要素都发生相应变化^[34]。城乡梯度首先表现在生活的方式、方便性和环境的空间梯度变化^[35],其次表现在景观格局指数(如斑块大小、密度、形状、香农多样性等)和土地利用的明显变化^[36]。许多研究表明植物多样性、鸟类群落以及生产力和生物量等生态功能都会沿着城乡梯度发生变化。Irwin 和 Bockstael^[37]报道破碎化是距市中心距离的函数,向外先增加再降低,最大值不断向外推进。这种外推也会受到城市发展填充的平衡。

城乡梯度是城市生态系统空间结构的一种重要形式和城市空间异质性的重要特征^[38],已经反映在城市生态系统要素、结构、过程、功能和服务的空间变化上^[39],具体表现在:

(1)生态系统要素城乡梯度:市区大量人类活动和污染排放,造成了从城市到乡村的气温降低^[40]、氮沉降减少^[41]和土壤污染物减少^[42]。道路街尘^[43-44]城乡间有较大区别。土壤碳氮库^[45]、植物^[46-48]和动物种类^[49-52]城乡间也有很大区别,城区入侵植物和伴人生物明显增加^[53-54],植物性状^[55]和植物对污染物的响应^[56]也会发生变化。

(2)生态系统结构城乡梯度:人类建设活动,造成土地利用的城乡梯度变化^[57],城区的不透水地表远远多于郊区^[58]。景观破碎化程度从中心城区向郊区先增加后减少^[59]。

(3)城市生态系统过程城乡梯度:在城市与乡村间,土壤微生物^[60]、碳矿化^[61-62]、硝化反硝化^[63-64]、碳通量^[65]、植物蒸腾等都会出现明显差异。

(4)城市生态系统功能城乡梯度:植物生物量和生产力的城乡梯度变化受到植被类型、土壤条件和其他环境条件等影响,没有表现出减少或增加的一致性规律^[34, 66-67]。

(5)城市生态系统服务城乡梯度:人们对生态系统服务在城乡间要求不一样。以植物为例,相比于郊区,城区植物的景观价值很受重视,生境质量较低^[68]。城乡间生态系统服务与需求的差异对生态环境保护政策制定意义重大^[69-70]。

在传统生态学中,梯度范式是一种非常高效的分析植物群落与环境间关系的研究手段^[71]。McDonnell 和 Pickett^[39]提出和发展了城乡梯度的概念,并建议将其作为城市生态学研究范式^[72]。作为一种科学范式,城乡梯度是指生态系统属性从城市到乡村的空间变化规律。从产生原因看,城乡梯度是社会经济发展和城市化的一个必然产物,其本质上是社会劳动空间分工和市场经济驱动的后果。社会经济发展形成了不同生产方式分工(如商业、农业、林业、工业等)。由于不同生产方式下土地的效益和成本的差异,形成了生产方式的空间分布格局。商业土地向城市中心聚集,农田和林地则逐步向城市以外区域退缩,首先形成土地利用的城乡梯度,最终导致生态系统属性的城乡梯度,包括生态系统的要素、结构、过程、功能和服务的城乡梯度变化。城市发展的规模效应,不断将人口和社会经济资源向城市中心聚集,使得城乡梯度的差异和范围不断增大。

城乡梯度的主导影响因素是人类活动。人口分布、产业布局和城市建设首先出现城乡梯度。在人类活动影响下,生态系统属性(如温度、物种、物候、碳氮循环、固碳等)也会出现城乡梯度。城乡梯度往往表现出多样化的特征,不但梯度因子和指标具有多样化,而且梯度形式也具有多样化。如气温沿城乡梯度降低、植物物候沿城乡梯度推迟、斑块密度沿城乡梯度先增加然后降低等。生态系统属性的城乡梯度变化可能是直接的或间接的,也可能是单一的或复杂的,这与城市所处的地理环境和发展历史有关。因此,城市生态系统变化沿城

乡梯度的因素识别有时是一件非常困难的事情。Gregg 等^[67]通过对纽约周边城乡梯度的植物生长与环境因子间关系分析,发现郊区幼树生长减缓的主要原因是由于郊区臭氧浓度的升高,而受城乡温度和氮沉降梯度的影响不大,说明了城乡梯度的复杂性。

城乡梯度研究对城市生态学的重要性主要体现在:(1)城乡梯度存在的普遍性。无论城市的大小、历史长短和地理环境优劣,城市化过程中都会形成不同形式的生态系统属性城乡梯度变化。(2)能够反映城市化生态环境影响程度。当城市逐渐占领农村地区的森林、草原和农田后,对区域生态环境会造成很大影响。通过生态环境状况或生态系统属性的城乡梯度调查分析,就可以评价和预测城市发展的生态环境影响。(3)能够作为生态学规律的自然实验场。城市化形成的城乡梯度,能够提供一种自然的环境梯度变化条件,可以作为开展生态环境因子(如温度、土地利用、水文等)变化对生态系统(包括生理、种群个和群落等)影响的理想场地,以探讨生态学的生物与环境间的关系。正如 McDonnell 和 Pickett^[39]说的,城乡梯度研究,将为生态学研究提供一个未开发的机会。

2.2 层级斑块动态范式

为了进一步研究人类活动对城市的影响,更好地为城市规划服务,城市生态学研究不但要研究城乡梯度的生态变化,而且还需要研究城市内部更复杂的空间异质性及其对城市生态过程和功能的影响^[2,21, 26-27, 31]。在城市内部,无论自然环境、还是社会经济活动并不是均一分布的。这不但很大程度上受到城市规划的控制,也与城市的自然地理基础、发展历史和人类活动特点有关,具有高度复杂性。这就是城市空间异质性的重要内容。

针对空间异质性,景观生态学家提出了基质、斑块、廊道(Matrix-patch-corridor)概念,后来又提出了边界(Boundary)概念^[73]。这4个空间异质性的描述概念中,斑块应该是最基本的空间单元。基质可以看成一个大斑块,廊道是一种线状斑块,边界是斑块间的交界或过渡。因此,可以说斑块是表征空间异质性的最基本单元。一个区域会被不同的斑块填满。不同斑块镶嵌构成了空间异质性的区域。城市就是一片具有内部异质性的土地,可以看成是由多种斑块镶嵌构成的生态系统。

空间异质性是随着时间动态变化的^[1]。自然地理背景空间变异和人类活动空间差异是城市空间异质性的重要起因。在外部干扰(如气候变化、灾害、人口迁移、人类建设活动)和城市本身演替作用下,城市组成斑块及其空间位置会发生变化,从而改变了城市内部空间异质性的特征,最终造成城市生态系统结构和功能的变化。斑块间相互作用和发展不平衡,也会改变城市空间异质性^[2]。其主要表现为城市斑块及其镶嵌结构的变化,主要有两种方式,一是边界扩张式,城市范围不断向外蔓延,摊大饼式发展,表现为城市斑块(如不透水地表或基础设施)的不断增大增多;二是内填发展式,通过城市内部斑块重构,提升城市集约程度,表现为城市内部的各种斑块(如绿地、道路、建筑物等)形状、属性及其配置的变化。城市空间单元及其变化反映在各种斑块及其变化上,特别是斑块性质和功能的变化,将直接影响城市生态系统结构和功能的变化。

层级结构分析作为一种认识自然界规律的基本手段。针对复杂系统,通过逐层分级,找到合适的层级水平开展研究,将有利于理解问题的机制和找到解决问题的方法^[74]。一般层级越高,空间和时间尺度范围越大和分辨率越粗,信息综合性越强。将层级结构分析和斑块动态分析相结合,即层级斑块动态对研究复杂生态系统具有很大优势^[75-76]。从垂直方向看,通过层级结构可以分解复杂系统,层级间有不对称关系。从水平方向看,通过斑块动态可以反映空间异质程度及其变化,同一层级的斑块是按照同一属性划分的,在生态系统中具有同样地位。针对城市生态系统,从城市尺度、到社区尺度、再到家庭尺度或一个建筑物,具有不同空间尺度和层级水平,对应不同的管理单元和具有不同的生态环境问题,也需要采用不同的研究方法分析和不同的解决方法应对。层级斑块动态能够提供信息损失较少情况下的城市生态系统分解研究的重要思路^[77]。由此可见,层级斑块动态范式(Hierarchical patch dynamics paradigm)这一生态学研究范式^[78],能够被应用到城市生态系统的空间异质性研究中。

对于城市这样一个多要素和多过程构成的复杂系统,其空间异质性耦合了分层级的组织结构和斑块镶嵌

的空间结构,其变化可以描述为层级斑块动态。对于城市生态系统研究,层级斑块动态范式是指城市空间异质性表现为各种动态变化的城市斑块按照等级层次进行组织。最简单的城市层级斑块动态范式(图1)是,城市是多种社会经济功能斑块(如住宅区、公园等)组成的,每一个功能斑块又都是由不同自然属性的斑块(如草坪、湖泊、房屋等)组成的。并且这些斑块在时间上是动态变化的,在空间上是相互镶嵌在一起的,层级越高,空间范围越大,时间变化越慢。

城市生态系统是一个通过多层级紧密联系成的整体,内部空间异质性的影响常常是跨层级的^[12]。例如,公园内植物群落空间配置的变化对生产力、固碳、水源涵养和鸟类多样性等的影响,不仅仅体现在公园尺度上,而且可能体现在整个城市、流域、乃至全球尺度上。

城市空间异质性包含了非常丰富的内容,不但体现在城

市自然、生物和社会结构的差异^[21,79],如地貌、不透水地表、水体、土壤、植被、基础设施、居民生活、工业生产和文化生活等,而且体现在生态系统过程和功能方面,如碳循环、氮循环、生产力和生物量等。采用层级斑块动态范式研究城市空间异质性,可以揭示城市生态系统不同层级间从上到下和从下到上的调控关系,及其斑块间的相互作用关系,不但有助于解释城市内部异质性格局及其形成原因,而且对理解城市生态系统的复杂性、弹性及其高效性和稳定性具有重要价值。

在城市生态系统研究中,Wu 和 David^[77]以美国的凤凰城为例,构建了一个层级斑块动态模型(Hierarchical patch dynamics model,HPD-PHX)框架,期望模拟城市生态系统的人与自然相互作用和空间异质性,通过城市土地利用变化和河岸植物变化动态的模拟,说明了该框架的可利用前途。Zhang 等^[80]成功地开发出了层级斑块镶嵌—城市生态系统模型(Hierarchical Patch Mosaic-Urban Ecosystem Model,HPM-UEM),在考虑城市生态系统的空间异质性和层级结构基础上,从植物个体到整个城市区域6个层级,构建了社会经济自然因素和生态系统相互作用的过程模型,模拟了复杂时空格局下,多种生态环境因素对城市生态系统功能的影响,得出了凤凰城生态系统碳库和初级生产力分布状况。虽然作为城市生态系统碳动态模拟,还有不足之处,如没有考虑城市人类活动的能源使用的直接碳排放和生活消费的碳动态,还有一些生态系统过程过于简化,但综合研究城市这个多层级多因素高空间异质性的复杂系统,应该是一种成功的探索。

城市生态系统的复杂性,决定了城市生态系统的层级斑块动态是一个复杂的过程,表现在城市生态系统(1)影响因素多、相互作用复杂,(2)空间变化大、斑块类型多样、分布格局复杂,(3)时间动态变化快,各种城市建设活动不断改变城市内部土地覆盖和利用,(4)各层级的特征和影响因素不同、层级间的从上而下和从下而上调控机制复杂,(5)斑块间的能量流动、物质迁移和物资运输过程多样而复杂。面对复杂的层级斑块动态,应该首先需要探讨一些基础性问题。如城市斑块的基本单元是什么?如何划分城市生态系统的层级水平?其次需要研究城市斑块动态及其层级关系,如(1)斑块空间分布格局如何,主要受哪些因素影响?(2)同层级斑块间是如何转换的,主要影响因素是什么,(3)上下层级斑块间是如何调控的?然后需要研究层级斑块动态对城市生态系统结构和功能的影响,最后应该和城市规划管理相结合,通过对城市生态系统层级斑块动态变化及其调控规律的认识,指导城市各类斑块的构建和优化,提升城市生态系统服务功能,促进城市可持续发展。

3 讨论和结论

城市作为一个复杂的生态系统,为人类生存和发展提供了高效的物质文化发展和科学技术创新基地,是

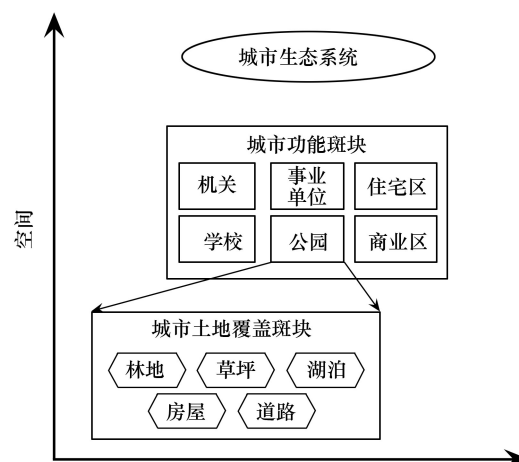


图1 城市层级斑块动态范式示意图

Fig.1 Schematic diagram of urban hierarchical patch dynamics

社会经济发展的主要引擎。但城市面临一系列生态环境问题,如热岛、污岛和涝岛等,已经严重威胁到城市可持续发展和人类健康及生存环境。空间异质性作为城市生态系统的重要特征,对城市的社会经济发展潜力和生态环境问题都有很大影响。城市规模越大,城市内部结构会越复杂,空间异质性会越大。高度的空间异质性能提供多样化的城市功能单元,有利于城市社会经济快速发展,但也意味着更大的生态环境问题风险,如污染物的排放量大种类多、热岛效应严重程度高。空间异质性,反映了城市各种自然和人文要素的空间布局,其合理与否,将会直接影响整个城市生态系统的过程、功能和服务。因此,城市空间异质性的研究,不但能够丰富生态学有关空间异质性的理论体系和技术方法,而且能够为分析城市生态环境问题的产生根源、演替过程和根治措施提供重要研究视角和科学手段。

城市空间异质性的表征指标有很多,应用最广泛的是景观生态学发展的各种景观格局指数。利用各种土地覆盖斑块或土地利用斑块的形状指数和多样性指数以及斑块配置相关的指数,城市生态学家一方面探讨了社会经济自然因素对城市斑块属性的影响,另一方面也探讨了城市斑块及其配置对城市热岛和洪涝等生态环境问题的影响,这将为城市规划和管理提供重要科学依据。在进行城市空间异质性表征时,往往需要划分城市斑块。目前,城市研究者提出了多种不同的城市斑块划分方法。应用比较广泛是城市土地利用分类和城市绿地分类方法。近来城市生态学家从城市斑块的物理属性(如透水性、有无植被等)提出了一些简单的城市斑块划分方法。但对于高度空间异质性的城市生态系统,这种基于斑块物理属性的简单分类是不够的,还应该考虑城市斑块的社会经济功能和生态系统功能。

目前认识到的城市空间异质性总体特征有两种:城乡梯度和层级斑块动态。这可以作为城市生态系统研究的两种重要范式。大量研究表明许多生态系统属性都具有城乡梯度变化规律,反映了城市化对生态环境的影响。对不同城市来说,具有城乡梯度变化的生态系统属性可能不同,城乡梯度变化程度也会不同。由此可见,城乡梯度出现与否要受到多种因素的综合影响,需要对城乡梯度变化出现的各种条件和机理进行深入探讨,为科学评价城市的生态环境影响和优化城市空间布局提供科学基础。层级斑块动态范式的研究目前还很少。城乡梯度范式能够描述城市生态系统属性的空间变化规律,而层级斑块动态范式只是一种研究城市生态系统属性空间变化的思路。还需要大量的调查监测和模型分析,对高度空间异质性的复杂城市生态系统,进行多尺度的时空变化综合研究,探讨城市斑块在不同层次水平以及时间和空间尺度上的变化规律,为评价空间异质性对城市生态系统的影响和开展城市规划和管理提供科学依据。

对于城市生态系统研究,上篇文章围绕城市生态系统和人与自然相互作用,提出了城市生态系统研究的黑箱范式、生态系统结构-过程-功能-服务级联范式和人与自然共存进化范式。文章围绕城市生态系统的空间异质性,提出了城市生态系统研究的城乡梯度范式和多层级斑块动态范式。这些简化式的思维方式,能够将城市这个复杂系统的多要素、多过程和多功能及其相互作用简单化,以聚焦研究的核心对象、关键过程和精确层级,找到认识问题的方法和解决问题的手段。例如,黑箱范式,可以从总体上分析城市生态系统的物质能量流动总量和转化效率,评价城市对资源环境的影响。人与自然共存进化范式,有助于分析人为因素和自然因素如何影响城市生态系统结构、过程和功能,两者如何协调才能有利于城市可持续发展。多层级斑块动态范式,可以表征城市不同层级结构和功能及其空间异质性,为开展城市生态调查(包括生物调查、人类活动调查)提供样地布点数量和定位原则,并为城市规划设计提供理论依据。

在城市生态系统中,人类和自然相互作用既会影响到空间异质性,也会受到空间异质性的影响。两者同时又会影响到整个城市生态系统。人与自然相互作用和空间异质性如何影响城市生态系统结构、过程、功能和服务,应该目前城市生态学研究的重点之一,对城市规划和管理具有重要指导意义^[81-82]。人与自然相互作用和层级斑块动态,是城市生态系统的两个重要特征,不但决定城市生态系统的结构,而且影响城市生态系统的过程和功能,使城市生态系统表现出更多复杂性特征,如非线性、时滞(Lag)、遗迹(Legacy)、意外(Surprise)、临界点(Tipping point)等,也将直接影响城市生态系统的稳定性和弹性。因此,城市生态学研究方法、包括监测、模拟实验和模型方法都需要改进,需要考虑人类活动的影响^[83]和空间异质性^[12]。

城市的生态系统性质、人与自然相互作用性质和空间异质性质是紧密交织在一起,应该将城市这三种性质耦合或融合起来开展研究。首先要从研究方法进行创新。对于非城市生态系统,已经有许多野外监测、模拟实验和生物地球化学模型,能够很好的观测和模拟生态系统的碳氮水循环及其对环境变化的响应,包括对人类的响应,但如何将这些研究方法应用到城市生态系统中,特别如何包含人工构筑物、人类选择和社会系统等考虑进来,是城市生态学面临的挑战。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] Band L E, Cadenasso M L, Grimm D C S, Grove J M, Pickett S T A. Heterogeneity in urban ecosystems: patterns and process//Lovett G M, Turner M G, Jones C G, Weathers K C, eds. *Ecosystem Function in Heterogeneous Landscapes*. New York: Springer, 2005: 257-278.
- [3] Mao Q Z, Huang G L, Buyantuev A, Wu J G, Luo S H, Ma K M. Spatial heterogeneity of urban soils: the case of the Beijing metropolitan region, China. *Ecological Processes*, 2014, 3(1): 23.
- [4] Escobedo F J, Nowak D J. Spatial heterogeneity and air pollution removal by an urban forest. *Landscape and Urban Planning*, 2009, 90(3/4): 102-110.
- [5] Li X M, Zhou W Q, Ouyang Z Y, Xu W H, Zheng H. Spatial pattern of greenspace affects land surface temperature: evidence from the heavily urbanized Beijing metropolitan area, China. *Landscape Ecology*, 2012, 27(6): 887-898.
- [6] Jenerette G D, Wu J G, Grimm N B, Hope D. Points, patches, and regions: scaling soil biogeochemical patterns in an urbanized arid ecosystem. *Global Change Biology*, 2006, 12(8): 1532-1544.
- [7] McDonnell M J, Hahs A K. The use of gradient analysis studies in advancing our understanding of the ecology of urbanizing landscapes: current status and future directions. *Landscape Ecology*, 2008, 23(10): 1143-1155.
- [8] Boone C G, Fragkias M. *Urbanization and Sustainability: Linking Urban Ecology, Environmental Justice and Global Environmental Change*. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 2013.
- [9] Kolasa J, Pickett S T A. *Ecological Heterogeneity*. New York: Springer, 1991.
- [10] Forman R T T. *Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions*. New York: Cambridge University Press, 1995.
- [11] Naveh Z. Ten major premises for a holistic conception of multifunctional landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 2001, 57(3/4): 269-284.
- [12] Cadenasso M, Pickett S, McGrath B, Marshall V. Ecological heterogeneity in urban ecosystems: reconceptualized land cover models as a bridge to urban design//Pickett S T A, Cadenasso M L, McGrath B. *Resilience in Ecology and Urban Design: Linking Theory and Practice for Sustainable Cities*. Dordrecht: Springer, 2013: 107-129.
- [13] 陈玉福,董鸣. 生态学系统的空间异质性. *生态学报*, 2003, 23(2): 346-352.
- [14] 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.
- [15] Weng Y C. Spatiotemporal changes of landscape pattern in response to urbanization. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 81(4): 341-353.
- [16] 申卫军, 郭建国, 任海, 林永标, 李明辉. 空间幅度变化对景观格局分析的影响. *生态学报*, 2003, 23(11): 2219-2231.
- [17] 齐杨, 郭建国, 李建龙, 于洋, 彭福利, 孙聪. 中国东西部中小城市景观格局及其驱动力. *生态学报*, 2013, 33(1): 275-285.
- [18] 郭冠华, 陈颖彪, 魏建兵, 吴志峰, 容晓臻. 粒度变化对城市热岛空间格局分析的影响. *生态学报*, 2012, 32(12): 3764-3772.
- [19] 黄聚聪, 赵小锋, 唐立娜, 邱全毅. 城市化进程中城市热岛景观格局演变的时空特征——以厦门市为例. *生态学报*, 2012, 32(2): 622-631.
- [20] Zhou W Q, Huang G L, Cadenasso M L. Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 102(1): 54-63.
- [21] 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.
- [22] Gill S E, Handley J F, Ennos A R, Pauleit S, Theuray N, Lindley S J. Characterising the urban environment of UK cities and towns: a template for landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 2008, 87(3): 210-222.
- [23] Larondelle N, Hamstead Z A, Kremer P, Haase D, McPhearson T. Applying a novel urban structure classification to compare the relationships of urban structure and surface temperature in Berlin and New York City. *Applied Geography*, 2014, 53: 427-437.
- [24] Hamstead Z A, Kremer P, Larondelle N, McPhearson T, Haase D. Classification of the heterogeneous structure of urban landscapes (STURLA) as an indicator of landscape function applied to surface temperature in New York City. *Ecological Indicators*, 2016, 70: 574-585.
- [25] Anderson J R, Hardy E E, Roach J T, Witmer R E. *A Land Use and Land Cover Classification System for Use with Remote Sensor Data*. Washington: US Government Printing Office, 1976.
- [26] 蒋高明. 城市植被: 特点、类型与功能. *植物学通报*, 1993, 10(3): 21-27.

- [27] Forman R T T. *Urban Ecology: Science of Cities*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [28] Qiu L, Gao T, Gunnarsson A, Hammer M, von Bothmer R. A methodological study of biotope mapping in nature conservation. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2010, 9(2): 161-166.
- [29] 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.
- [30] Farinha-Marques P, Fernandes C, Guilherme F, Lameiras J M, Alves P, Bunce R G H. Urban Habitats Biodiversity Assessment (UrHBA): a standardized procedure for recording biodiversity and its spatial distribution in urban environments. *Landscape Ecology*, 2017, 32(9): 1753-1770.
- [31] Pickett S T A, Cadenasso M L, Grove J M, Boone C G, Groffman P M, Irwin E, Kaushal S S, Marshall V, McGrath B P, Nilon C H, Pouyat R V, Szlavecz K, Troy A, Warren P. Urban ecological systems: Scientific foundations and a decade of progress. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(3): 331-362.
- [32] Imperato M, Adamo P, Naimo D, Arienzo M, Stanzione D, Violante P. Spatial distribution of heavy metals in urban soils of Naples city (Italy). *Environmental Pollution*, 2003, 124(2): 247-256.
- [33] Fan C, Myint S. A comparison of spatial autocorrelation indices and landscape metrics in measuring urban landscape fragmentation. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 121: 117-128.
- [34] Zipperer W C, Guntenspergen G R. Vegetation composition and structure of forest patches along urban-rural gradients//McDonnell M J, Hahns A K, Breuste J H, eds. *Ecology of Cities and Towns*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2009: 274-286.
- [35] Douglas I, James P. *Urban Ecology: An Introduction*. New York: Routledge, 2015.
- [36] Alberti M. *Advances in Urban Ecology: Integrating Humans and Ecological Processes in Urban Ecosystems*. New York: Springer, 2008.
- [37] Irwin E G, Bockstael N E. The evolution of urban sprawl: evidence of spatial heterogeneity and increasing land fragmentation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(52): 20672-20677.
- [38] Romagosa C M, Morse W C, Lockaby B G. Emerging issues along urban-rural interfaces: an introduction to the special issue. *Urban Ecosystems*, 2013, 16(1): 1-2.
- [39] McDonnell M J, Pickett S T A. Ecosystem structure and function along urban - rural gradients: an unexploited opportunity for ecology. *Ecology*, 1990, 71(4): 1232-1237.
- [40] 肖荣波, 欧阳志云, 李伟峰, 张兆明, 王效科. 城市热岛时空特征及其影响因素. *气象科学*, 2007, 27(2): 230-236.
- [41] Lovett G M, Traynor M M, Pouyat R V, Carreiro M M, Zhu W X, Baxter J W. Atmospheric deposition to oak forests along an urban-rural gradient. *Environmental Science & Technology*, 2000, 34(20): 4294-4300.
- [42] 方淑波, 崔曲, 庞慧焕, 田壮, 印春生, 杨晓英. 上海市城乡梯度上土壤重金属空间分布及其影响因素定量分析. *环境科学学报*, 2015, 35(12): 3976-3984.
- [43] 何小艳, 顾培, 李叙勇, 赵洪涛. 北京市城乡环境梯度下街尘中重金属污染特征. *环境科学*, 2013, 34(1): 357-363.
- [44] 唐荣莉, 马克明, 张育新, 毛齐正. 北京市道路灰尘中污染物含量沿城乡梯度、道路密度梯度的变化特征. *环境科学*, 2013, 34(1): 364-372.
- [45] Nagy R C, Lockaby B G, Zipperer W C, Marzen L J. A comparison of carbon and nitrogen stocks among land uses/covers in coastal Florida. *Urban Ecosystems*, 2014, 17(1): 255-276.
- [46] 朱纯, 熊咏梅, 柳泽鑫, 孙东, 苏志尧. 城乡环境梯度下植物群落的区系成分分析. *亚热带植物科学*, 2012, 41(4): 25-30.
- [47] 田志慧. 上海城乡陆生生态系统杂草群落多样性格局及其成因论研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2011.
- [48] 郭培培. 城乡梯度上的乔木分布格局与功能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [49] 陈向, 周伟奇, 李伟峰. 北京河流底栖硅藻沿城乡梯度带空间分布及其季节变化. *生态学报*, 2017, 37(10): 3586-3595.
- [50] 寿丹艺. 上海城乡梯度上公园绿地鸟类物种多样性格局[D]. 上海: 华东师范大学, 2015.
- [51] 刘小丽, 陈晓双, 王伟波, 达良俊. 城乡梯度上哈尔滨城市杂草分布格局及生境型生态种组划分. *城市环境与城市生态*, 2013, 26(3): 22-25.
- [52] Niemelä J, Kotze D J, Venn S, Penev L, Stoyanov I, Spence J, Hartley D, de Oca E M. Carabid beetle assemblages (Coleoptera, Carabidae) across urban-rural gradients: an international comparison. *Landscape Ecology*, 2002, 17(5): 387-401.
- [53] Reichard S H, White P. Horticulture as a Pathway of Invasive Plant Introductions in the United States: Most invasive plants have been introduced for horticultural use by nurseries, botanical gardens, and individuals. *Bioscience*, 2001, 51(2): 103-113.
- [54] Bar-Massada A, Radeloff V C, Stewart S I. Biotic and abiotic effects of human settlements in the wildland-urban interface. *Bioscience*, 2014, 64(5): 429-437.
- [55] 段秀文, 蔡北溟, 陈晓双, 崔易翀, 达良俊. 城乡梯度上一年生杂草叶片氮磷含量的变化及其与土壤氮磷的关系. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2015, (2): 133-140.
- [56] 张红星, 孙旭, 姚余辉, 万五星, 肖扬, 孙滨峰, 韩春萌, 郜世奇, 高付元, 徐卫华, 冯兆忠, 欧阳志云, 王效科. 北京夏季地表臭氧污染分布特征及其对植物的伤害效应. *生态学报*, 2014, 34(16): 4756-4765.
- [57] 崔王平, 李阳兵, 李潇然. 重庆市主城区景观格局演变的样带响应与驱动机制差异. *自然资源学报*, 2017, 32(4): 553-567.
- [58] 李俊祥, 王玉洁, 沈晓虹, 宋永昌. 上海市城乡梯度景观格局分析. *生态学报*, 2004, 24(9): 1973-1980.
- [59] 仇江啸, 王效科, 逯非, 欧阳志云, 郑华. 城市景观破碎化格局与城市化及社会经济发展水平的关系——以北京城区为例. *生态学报*,

- 2012, 32(9): 2659-2669.
- [60] 赵哲霞, 郭恢财. 城市化对城乡梯度森林土壤微生物数量变化的影响(英文). 农业科学与技术, 2010, 11(3): 118-122.
- [61] 卢锐, 彭小英, 刘以珍, 余明泉. 水热因素对城乡梯度森林土壤碳矿化的影响. 南昌大学学报: 理科版, 2015, 39(2): 199-204.
- [62] Pouyat R V, McDonnell M J, Pickett S T A. Litter decomposition and nitrogen mineralization in oak stands along an urban-rural land use gradient. *Urban Ecosystems*, 1997, 1(2): 117-131.
- [63] 陈帅, 王效科, 逯非. 城市与郊区森林土壤微生物群落特征差异研究. 土壤通报, 2012, 43(3): 614-620.
- [64] 余明泉, 杜天真, 陈伏生. 城乡梯度森林土壤原易位 N 矿化. 林业科学研究, 2009, 22(1): 69-74.
- [65] Kaye J P, McCulley R L, Burke I C. Carbon fluxes, nitrogen cycling, and soil microbial communities in adjacent urban, native and agricultural ecosystems. *Global Change Biology*, 2005, 11(4): 575-587.
- [66] 杨荣武. 城乡环境梯度及其对植物生物量影响[D]. 南京: 南京大学, 2013.
- [67] 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.
- [68] Hou Y, Müller F, Li B, Kroll F. Urban-rural gradients of ecosystem services and the linkages with socioeconomics. *Landscape Online*, 2015, 39(1): 1-31.
- [69] Baró F, Gómez-Baggethun E, Haase D. Ecosystem service bundles along the urban-rural gradient: Insights for landscape planning and management. *Ecosystem Services*, 2017, 24: 147-159.
- [70] Kroll F, Müller F, Haase D, Fohrer N. Rural-urban gradient analysis of ecosystem services supply and demand dynamics. *Land Use Policy*, 2012, 29(3): 521-535.
- [71] Whittaker R H, Niering W A. Vegetation of the Santa Catalina Mountains, Arizona: a gradient analysis of the South Slope. *Ecology*, 1965, 46(4): 429-452.
- [72] Carreiro M M. Using the urban-rural gradient approach to determine the effects of land use on forest remnants//Carreiro M M, Song Y C, Wu J G, eds. *Ecology, Planning, and Management of Urban Forests: International Perspectives*. New York: Springer, 2008.
- [73] Cadenasso M L, Pickett S T A, Weathers K C, Jones C G. A framework for a theory of ecological boundaries. *Bioscience*, 2003, 53(8): 750-758.
- [74] O'Neill R V, King A W. Homage to St. Michael: or why are there so many books on scale? //Peterson D L, Parker V T, eds. *Ecological Scale: Theory and Application*. Columbia: Columbia University Press, 1998.
- [75] Wu J G, Loucks O L. From balance of nature to hierarchical patch dynamics: a paradigm shift in ecology. *The Quarterly Review of Biology*, 1995, 70(4): 439-466.
- [76] Wu J. Hierarchy and scaling: extrapolating information along a Scaling Ladder. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1999, 25(4): 367-380.
- [77] Wu J G, David J L. A spatially explicit hierarchical approach to modeling complex ecological systems: theory and applications. *Ecological Modelling*, 2002, 153(1/2): 7-26.
- [78] 邬建国. 生态学范式变迁综论. 生态学报, 1996, 16(5): 449-460.
- [79] 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.
- [80] 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.
- [81] Alberti M, Marzluff J M. Ecological resilience in urban ecosystems: Linking urban patterns to human and ecological functions. *Urban Ecosystems*, 2004, 7(3): 241-265.
- [82] Pickett S T A, Cadenasso M L. Urban Ecology//Meyers R A, ed. *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*. New York: Springer, 2012: 11324-11343.
- [83] Collins J P, Kinzig A, Grimm N B, Fagan W F, Hope D, Wu J G, Borer E. A new urban ecology. *American Scientist*, 2000, 88(5): 416-425.