

DOI: 10.5846/stxb201508211749

徐翀崎, 李锋, 韩宝龙. 城市生态基础设施管理研究进展. 生态学报, 2016, 36(11): - .

Xu C Q, Li F, Han B L. Progress in research on urban ecological infrastructure management. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(11): - .

## 城市生态基础设施管理研究进展

徐翀崎<sup>1,2</sup>, 李锋<sup>1,\*</sup>, 韩宝龙<sup>1</sup>

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

2 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:**城市生态基础设施作为城市生态系统的重要组成部分,在维持自然生态过程稳定、促进社会经济发展、保障人居环境质量方面发挥着重要的作用。在快速城市化进程中,对城市生态基础设施进行科学的管理显得尤为重要。本文在重新明确城市生态基础设施管理概念和内涵的基础上,归纳提炼了四项管理原则,并对现有管理类型进行了梳理。此外,还对生态基础设施管理涉及的三个关键问题的常见解决方法进行了总结、分类,并对每类方法的优劣进行了分析讨论。最后,本文针对此领域的工作做了进一步展望。对于现有城市生态基础设施管理问题与方法的整合研究既有利于明确今后研究重点,也为城市生态基础设施管理提供了科学依据和案例参考。

**关键词:**生态基础设施;城市管理;核心区域;空间格局

## Progress in research on urban ecological infrastructure management

XU Chongqi<sup>1,2</sup>, LI Feng<sup>1,\*</sup>, Han Baolong<sup>1</sup>

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

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

**Abstract:** As an important component of both urban complex socio-economic-natural ecosystems and urban infrastructure, urban ecological infrastructure plays an important role in maintaining the stability of natural ecological processes. It furthermore promotes social and economic development, and is important for guaranteeing the quality of the living environment. In the process of rapid urbanization, scientific management of urban ecological infrastructure is particularly important. Therefore, this paper reviewed four core components (its definition, the principles, management types, and key theoretical problems and related methods) of urban ecological infrastructure management (UEIM), in order to clarify the existing methods, and their strengths and weaknesses, to benefit future urban ecological infrastructure management. The first part of this study discusses two questions: what is UEIM, and what should UEIM do. UEIM is an active management process. First, it should define the principles of ecological infrastructure protection and construction in favor of sustainable urban development in the urbanization process. Furthermore, the integration of existing UEIM approaches in this process is useful, as the ultimate objective is to propose a system of UEIM approaches. In the second part, we suggest four principles for UEIM, for which explanations and several examples are provided. These principles include the preferential protection principle, the structural optimization principle, the dynamic adaptability principle, and the appropriate intervention principle. In the third part, we review the existing methods for UEIM and separate them into two types: guiding management (related policy and market strategy) and compulsory management (laws and regulations, and compulsory trade standards). In the fourth and most important part, three key issues regarding quantitative management and its related methods are

基金项目:国家自然科学基金面上项目(71273254)和重点项目(71533004)

收稿日期:2015-08-21; 修订日期:2016-01-06

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

summarized. This includes how to identify urban ecological infrastructure hubs, how to account suitable areas of urban ecological infrastructure, and how to optimize the pattern of urban ecological infrastructure. Hubs in the urban ecological infrastructure network represent the most ecologically important large natural areas that remain urban. These hubs can be identified by species diversity index, maximum continuous area, the value of the ecological system services, or conservation areas already protected by the government. The practical method for estimating a suitable ecological infrastructure area can be divided into three categories: the method based on experiences and standards, the supply-demand balance calculation method (carbon-oxygen balance method, or precipitation and water-holding capacity), and the ecological security pattern based on ecological processes (the water security pattern, biological diversity security pattern, or scope of geological hazards). Furthermore, methods of constructing optimal patterns for ecological infrastructure can be broadly divided into three categories: a property evaluation (relevance, suitability, or sensitivity), an index optimization model (landscape index, or graph theory), and an ecosystem process model (based on the actual landscape pattern process, or based on the simulated cost-distance model). In the final section, suggestions for future studies were put forward, which highlight the importance of UEIM at multiple scales. Since apparent connections between the different scales exist, it is important for urban ecological infrastructure management to integrate multiple scale analyses, and to clearly identify the relationships between these different scales.

**Key Words:** ecological infrastructure; urban management; hubs; spatial patterns

城市是一类以人类活动为中心的社会-经济-自然复合生态系统<sup>[1]</sup>,城市基础设施则是城市存在和发展的物质基础<sup>[2]</sup>。随着城市扩张带来的“城市病”现象越来越严重,城市生态基础设施这一概念逐渐被提出并得到了广泛的关注和认可<sup>[3-5]</sup>。城市生态基础设施既是城市复合生态系统的重要组成部分,提供着维持自然生态过程稳定的功能;又是城市基础设施的重要组成,在促进社会经济发展、保障人居环境质量方面发挥着重要的作用。对于城市生态基础设施的科学管理将直接决定着城市生活环境和生活质量的优劣。因此,本文从城市生态基础设施管理的概念内涵、保护和构建原则、现有管理方法、管理理论基础和模型等方面进行归纳总结,并进行深入讨论,进而明确今后的研究重点,并为城市生态基础设施管理提供经验和样本。

## 1 城市生态基础设施及其管理的概念及内涵

### 1.1 城市的定义与尺度问题

在科学界,城市的定义从未有过统一的答案,不同国家以及不同学科赋予了城市不同的定义<sup>[6]</sup>。在生态学或环境学科中,我国学者尝试用定量化方法提取城市边界的研究有许多,如夜间灯光数据提取法<sup>[7]</sup>、碳排放核算法<sup>[8]</sup>、全色遥感影像提取法<sup>[9-10]</sup>、雷达干涉相干系数分析法<sup>[11]</sup>等,但也并未有统一的结论。鉴于本文研究内容的需要,定义城市的范围为市域范围主要是参考行政边界进行划定。另外针对建成区尺度和社区尺度等不同尺度存在研究侧重点不同的问题,本文也将对其特点与差异进行论述。

### 1.2 生态基础设施的定义与范围

刘海龙等<sup>[12]</sup>的研究综述对“生态基础设施”(Ecological Infrastructure, EI)名词的起源、国内外研究中其内涵的发展演化过程,以及与“绿色基础设施”(Green Infrastructure)等相关概念进行了详细的阐述与辨识,其中也涵盖了我国王如松、俞孔坚等知名学者的研究成果。李锋等<sup>[5]</sup>在此基础上提出了“城市生态基础设施”的概念和范围。

简单来说,城市生态基础设施包括绿色基础设施(绿地、湿地)和生态化的工程基础设施(生态化手段改造或替代道路工程、不透水地面、屋顶墙体等),是城市可持续发展的重要基础,也是建设生态城市的重要保证<sup>[5,12]</sup>。生态基础设施是一个综合的网络体系,对于规划、建设和管理生态城市具有重要的指导和评价意义,因此将生态基础设施作为一个整体提出,目的是保持体系的系统性和完整性。

### 1.3 城市生态基础设施管理的内涵

对于管理的定义目前没有统一结果,且随着人们认识的深入和管理实践的发展而不断发展。聂法良等<sup>[13]</sup>通过分析统计国内外专家学者对于管理所做的 24 个定义,发现“职能、资源、目标”出现的频率最高,并归纳出具有共识性的观点,即“管理是一个过程”。管理的概念和体系随着与各项学科的交叉应用中不断的丰富和完善,并有所侧重,在城市生态学领域则产生了城市管理、生态管理、城市生态管理、城市复合生态管理等概念和体系。因为注重过程,所以这些概念都会明确管理目标、管理主体、管理对象、管理方法。

城市生态基础设施管理目标以城市可持续发展为总体目标,通过对现有生态基础设施重要性进行评估、合理性进行评价,进而找出问题,设定相应目标;管理对象包括现有城市生态基础设施和应成为生态基础设施的部分;管理方法包括政策引导、市场引导、立法保护等。

本文认为,城市生态基础设施管理是一个主动的管理过程,不是被动的拟合原有的城市扩张规律和生态基础设施斑块破碎化的趋势分析,而是需要明确城市增长和扩张过程中有利于城市可持续发展的生态基础设施保护和构建的原则,并整合现有的相关管理方法,提出一套针对城市生态基础设施的系统的管理方法与方案。

## 2 城市生态基础设施管理原则

通过对已有的优秀生态基础设施构建和管理案例<sup>[14-17]</sup>进行研究,分析其中的指导思想与核心问题,并结合前人对生态基础设施构建原则的看法<sup>[4]</sup>加以梳理总结,最终本文概括性的提炼出了四大核心原则。

### 2.1 优先保护原则

生态基础设施核心区域是构成城市大环境生态基础设施网络的核心,也是防止城市无序扩张蔓延的重要防线,是保障城市生态安全的最基本前提。因此,优先保护原则旨在通过识别和判断生态基础设施中重要性高的区域,即生态基础设施核心区域,进而优先进行强制性重点保护和永久保留<sup>[4]</sup>。

### 2.2 结构优化原则

已有研究表明,生态网络结构的构建可大幅提升生态系统服务功能<sup>[18]</sup>有助于保护生态环境、维持生态安全,又有利于生态系统服务功能发挥更大的价值。另外,景观生态学中“斑块—廊道—基质”概念已成为此类领域众多研究的基础<sup>[14,19-23]</sup>。因此,结构优化原则旨在通过保护和重建重要生态廊道,紧密联系各生态基础设施核心区,形成绿网、水网等网络体系,进而优化城市空间布局、引导城市发展规划、改善城市生态环境。

### 2.3 动态适应性原则

由于城市发展的动态性导致了生态用地逐渐被蚕食的动态性。城市发展扩张的新增建设用地选址的科学性会决定对生态基础设施结构和功能影响的程度<sup>[17]</sup>。因此,动态适应性原则旨在保留生态基础设施核心区域和网络结构的同时,予以城市发展一条对生态基础设施结构和功能影响最小的动态的发展路径,也是生态基础设施的动态保护路径,有利于为城市总体规划、土地利用总体规划提供科学依据。

### 2.4 适度干预原则

城市生态基础设施的管理并非一味的保护而拒绝人工的干扰。事实上,对于脆弱性强的未利用地、硬化的城市地表等可作为生态基础设施的用地需要一定的人工设计和适当的工程措施才能达到生态基础设施的要求。对于与城市居民生活密切相关生态基础设施,如城市公园、居住区附属绿地等,在构建过程中也应充分注重视觉美感,增强其休闲娱乐功能。另外,屋顶绿化建设成本相对较低,且可以提供多种生态服务功能,如缓解热岛效应、降低城市噪音、改善城市景观等,具有推广价值<sup>[24-26]</sup>。因此适度干预原则旨在对于建设和改造生态基础设施时,适当的进行人工干预,利用先进的工程技术和景观学原理、美学原理等科学原理进行优化,从而提高其生态系统服务功能的价值。

## 3 城市生态基础设施管理类型

由于城市生态基础设施管理的复杂性和构建内容的多样性,现阶段关于城市生态基础设施的管理较为分

散,缺乏系统全面的城市生态基础设施管理体系,相应的法律法规也较为缺乏。目前,对于国内外城市生态基础设施的管理类型可以总结为两大类:引导式管理和强制性管理。

### 3.1 引导式管理

引导式管理主要是通过政府政策引导或市场引导,进而对城市生态基础设施进行保护和恢复的管理方法。政策引导管理的空间尺度往往较大,如区域尺度、市域尺度等,因此需要进一步进行规划细化才能落实;市场引导则是依靠经济杠杆,由市场自发的进行调控,周期较长,效果较慢。

### 3.2 强制性管理

强制性管理主要是通过相关立法和强制性标准等来对城市生态基础设施进行强制性保护和修复措施。由于相关法律法规和强制性标准要落到实处,其涉及空间尺度相对较小或是针对的内容更为单一,例如居住区尺度、建成区尺度或只针对耕地、湿地、水体等某一项生态基础设施。由于强制性管理具有法律效力,且指标范围明确,因此是一类快速有效的管理方法。

引导式管理可在条件成熟时转化成强制性管理。引导式管理一般属于具有相对明确目标的探索式管理,需要一段较长的周期深入研究相关理论机理,并进行试点应用,实际验证效果符合预期的才能最终形成强制性管理的法律条文或行业标准等。表 1 归纳了我国与城市生态基础设施有关的部分较为重要的和最新的管理政策及其类型。

表 1 我国城市生态基础设施相关管理类型与具体政策

Table 1 Urban Ecological Infrastructure Management types and specific policies in China

	管理类型 Management types		管理政策 Specific management policies
引导式管理 Guiding management	政策引导	总体规划	国家五年规划
			土地利用总体规划
			城市总体规划
		重要生态基础设施	主体功能区规划
		专项规划	生态脆弱区保护规划纲要 生态功能区划
	市场引导	荣誉称号与奖励	生态县、生态市、生态省建设指标
		技术与导则	生态保护红线划定技术指南 生态文明体制改革总体方案 海绵城市建设技术指南
			生态补偿制度
			关于加快推动我国绿色建筑发展的实施意见
强制性管理 Compulsory management	法律法规	综合性法律法规	环境保护法
		重要生态基础设施	中华人民共和国自然保护区条例
		专项法律法规	基本农田保护条例 饮用水水源保护区污染防治管理规定
	强制性标准		城市用地分类与规划建设用地标准
			城市居住区规划设计规范

## 4 城市生态基础设施管理关键内容及对应方法

对于生态基础设施的管理不论是处于摸索期的引导式管理还是已经形成法律条款的强制性管理,都有相应支持的关键内容与对应方法。因此本文在概述城市生态基础设施及其管理概念、原则和类型的基础上,对三个关键问题(识别生态基础设施核心区域、核算生态基础设施合理面积、优化生态基础设施布局)的常见解决方法进行了总结、分类,并对每类方法的优劣进行了分析讨论(表 2)。对于现有关键问题以及解决方案的整合研究既有利于明确今后研究重点,也为城市生态基础设施管理提供了科学依据和案例参考。

表 2 城市生态基础设施管理关键内容、对应方法分类及其优劣分析

Table 2 Urban Ecological Infrastructure Management: Key issues, methods and pros &amp; cons analysis

关键内容 Key issues	方法分类 Method classification	优点 Advantages	缺点 Disadvantages
城市生态基础设施核心区域识别 Identification of urban ecological infrastructure hubs	直接识别法	简单明确、易于操作	部分边界较难落实到具体坐标
城市生态基础设施合理面积核算 Suitable area accounting of urban ecological infrastructure	因子叠加识别法	内容全面、因地制宜、指标选取灵活	部分数据不易获取,工作量大;等级划分与权重确定主观性较强
	经验标准法	计算简单、政策支持	地方差异考虑不足;部分指标存在较大争议
	供需平衡法	思路清晰、科学性强;可基于其他数据预测未来	地方差异较大,结果可比性差;准确数据不易获取,数据精度不高;仅考虑单一功能
	安全格局法	考虑多种生态功能,综合性强	表达结果多层次,描述主观性大;阈值确定和阻力值赋值主观性大
城市生态基础设施布局优化与构建 Pattern optimization of urban ecological infrastructure	属性评价法	内容全面、综合性强;结果分类分级,得出重要性排序	计算过程繁琐;分类分级阈值难以确定;构建模型通用性较差
	多指标优化法	计算量小;可为多目标决策提供依据	指数解释受尺度影响大;考虑因素单一
	生态过程法	选择重要生态过程;针对性强、实用性高	计算复杂、数据量大;对使用者综合要求高

#### 4.1 城市生态基础设施核心区域识别

城市生态基础设施核心区域应该包括难以移动、难以复制、具有高复合生态价值或开发成本高、开发风险性大的不适宜进行工业化或城镇化建设的区域以及国家明令保护的区域。通常,核心区域的确定方法可总结为以下两种:直接识别法和因子叠加识别法。

相关研究表明,一般可直接划入核心区域的生态基础设施包括:最具生态重要性的大型自然斑块<sup>[20,21]</sup>(敏感物种栖息地、连续分布超过 100 公顷的森林、100 公顷以上的原生生态湿地)和国家指定的保护区<sup>[19]</sup>(国家级自然保护区、世界文化和自然遗产、国家重点风景名胜区、国家森林公园、国家地质公园、一级地表水源保护区<sup>[27]</sup>)。事实上,通过研究申报条件可以发现,国家强制性保护的区域,都是具有极高社会——经济——自然复合生态价值的区域。另外,除了现有生态基础设施核心区域的保护,一些人工恢复和构建的生态基础设施也会成为核心区域得到永久保护。例如胡洁等<sup>[28]</sup>设计的北京奥林匹克森林公园作为人工新建的生态基础设施被北京市人民政府定位为永久性的城市公共绿地,并对周边提供着重要的生态服务功能。

因子叠加识别法,类似千层饼模式<sup>[29]</sup>和环境敏感区域模型<sup>[30]</sup>,通过筛选易获得且相关性强的因子,获取其图层进行重要性分类分级<sup>[20]</sup>,之后应用 GIS 进行叠加计算分析,得到最终的受保护区域。常见的因子包括生物多样性、敏感物种分布图、坡度、地面起伏度、工程地质图、土壤深度、植被覆盖度、地质灾害发生图、道路、水体、人工化程度等<sup>[20,31]</sup>。以此模型为基础,众多学者分别从生态安全格局<sup>[14,22,23]</sup>、可持续发展<sup>[32,33]</sup>、土地利用现状规律<sup>[34,35]</sup>、市域尺度生态经济区划<sup>[31]</sup>、生态用地重要性分级<sup>[36,37]</sup>、生态系统服务功能价值和开发风险性<sup>[20]</sup>、生态敏感性与脆弱性<sup>[38,39]</sup>的角度进行研究,表明通过 GIS 叠加各因素计算得到的地质灾害易发区、生态敏感区、生态功能重要区,以及具体的包括坡度较陡或海拔较高的山地、河网、海岸带和连续分布的且具有较大面积的林地等应成为生态恢复和保护的重点。

综合对比这两种方法,可以发现:直接识别法依据国家相关的保护规定和现有的较为认可的大型自然斑块,将这些区域直接进行保护规避了复杂的分析过程,简单明确,易于操作,但是此方法现存的最大问题就是保护边界往往不能落到具体的坐标,导致无法进行严格的保护;因子叠加识别法考虑因素系统全面,因子选取因地制宜,有较好的灵活性、综合性和科学性,但此方法最大的问题在于关于因子的筛选方法、因子图层重要性分类分级的依据、图层之间叠加的权重等问题目前尚无统一规定,这就造成了模型使用者必须具备扎实的生态学基础和项目经验,才能做出符合实际的科学的结果。

## 4.2 城市生态基础设施合理面积核算

生态基础设施面积核算方法可以分为三类:经验标准法、供需平衡法和安全格局法。

经验标准法一般遵照国家和地方的相关法律、法规、标准以及参照地方政府的发展目标,进而明确城市生态基础设施的面积。此类经验标准总结起来还可以分为两类,一类是对生态基础设施总量的控制要求,例如卫生学和防灾防震对城市绿地面积比例的要求<sup>[40]</sup>、土耳其发展法对大城市市区范围内和范围外人均开敞空间的要求<sup>[41]</sup>、我国开展生态城市等评定工作时对绿地率、绿化覆盖率等标准;另一类是各个管理部门对于不同类型生态基础设施的专项要求,例如我国在对绿地规划指标相关标准有最低要求的《城市绿化规划建设指标的规定》,城市湿地规划则需要在保持自然水系状态的前提下,符合《城市水系规划导则》中对城市水面率的要求及《城市蓝线管理办法》中对水系的规划管理要求<sup>[42]</sup>等。

基于生态系统服务功能的供需平衡法是测算合理的生态基础设施面积比较常见的方法,通常选取一种生态系统服务功能进行研究和计算,但并非所有功能都适宜在市域尺度进行供需平衡测算。Costanza等<sup>[43]</sup>于1997年系统的提出了17项生态系统服务功能,Bolund和Hunhammar<sup>[44]</sup>在此基础上进行研究认为,其中6项服务功能(净化空气、减缓热岛效应、噪声削减、雨水内排、污水处理、娱乐与文化价值)在城市范围内尤其重要,并讨论了对应的生态系统在城市中的面积和价值。对于碳氧平衡理论,在论证了市域等小尺度研究的合理性和对于全球尺度碳氧平衡的重要作用<sup>[45]</sup>之后,许多科学家基于此理论分别根据固定年份城市耗氧量<sup>[46]</sup>、预测人口增长及耗氧量<sup>[47]</sup>等进行了静态或动态的计算。Yin等<sup>[48]</sup>和Andin等<sup>[41]</sup>则建立了测算碳氧平衡的模型提高计算准确性。此外,根据供需平衡原理,Bagliani等<sup>[49]</sup>将人类社会的生态需求与自然土地的生产供给能力通过生态足迹和生态承载力相结合,来测算城市的生态基础设施需求。赵丹等<sup>[50]</sup>基于生态绿当量的概念,依据当地日最大降雨量与生态基础设施单位面积饱和蓄水能力的关系,提出了核算城市生态基础设施合理面积的标准。Li等<sup>[51]</sup>人借助最小累积阻力模型,分别基于生态用地源和建设用地源,模拟阻力面,计算了符合常州市经济发展与生态保护平衡需求的适宜生态用地占常州城市土地总面积的比例。

第三种方法是基于主要生态过程的安全格局法。城市生态安全格局结合了景观生态学理论和方法,侧重生态过程的识别与保护,是一种确立合理的生态基础设施面积的方法<sup>[14,22]</sup>。目前,应用较多的主要生态过程包括水文、地质灾害、生物多样性保护、文化遗产、游憩过程五大类<sup>[14,52]</sup>。苏泳娴等<sup>[52]</sup>在构建佛山市高明区生态安全格局时还创新的引入了农田安全格局和大气安全格局。此方法在不断完善的过程中,较为综合的考虑了城市居民安全和生态过程安全,构建的安全格局在确定了生态基础设施空间分布的同时也得到了适宜的生态基础设施面积。

现有的三种方法各有优劣。经验标准法参照已有的经验和标准,其最大的优点是计算简单明确,有政策支持;缺点在于不同地方的政府由于生态环境建设目标的不同导致城市地域的生态用地需求数量规模也不尽相同,有些评价指标的科学性与合理性甚至存在很大的争议。由于此方法所参考的标准都是科学研究与实证结果的总结,因此加强相关基础研究,完善基本可靠的科学依据也是制定一些标准的基础。供需平衡法优点是针对某项生态服务的需求进行供给性分析,思路清晰,还可预测未来;缺点是现有的计算大多以生态基础设施提供的单项生态系统服务功能为核算依据,所核算的阈值难以确定,所选生态功能的代表性强弱有待验证,另外单项生态系统服务的供需平衡算法也受到诸如数据来源的准确性、具体算法的多样性、绿地类型的差异性等因素的较大干扰,影响结果的可靠性。目前,未见综合考虑多种服务功能进行测算面积比对的研究,因此,该方法仍有待于进一步综合研究。安全格局法优点在于生态功能代表性强,以保证重要生态过程为目标,同时可以确定数量规模与对应空间分布;缺点在于结果表达方式为多层次水平,对于不同水平的描述主观性较大,且阈值确定的合理性、最小累积阻力模型阻力值的高敏感性,都会对结果有较大影响,所以该领域进一步研究的重点是提高过程模拟模型的科学性和划分阈值的合理性。

## 4.3 城市生态基础设施布局优化与构建

通过总结国内外相关研究发现,生态基础设施格局的优化与构建方法大致可分为三类:属性评价法、多指

标优化法和生态过程法。

属性评价法旨在通过构建评价指标体系(重要性、适宜性、敏感性),进而评价已识别的生态基础设施,明确不同区域的价值高低排名,并对评价结果高的区域和结构予以保护和保留。该方法的特点是针对已经存在的生态基础设施进行优先保护。例如,Pereira 等<sup>[53]</sup>通过计算移除斑块后对连接概率指数(Probability of Connectivity Index)的影响程度来确定斑块的相对重要程度。Weber 等<sup>[20]</sup>在马里兰州构建的绿色基础设施评价模型给出了辨识斑块和廊道的方法,并分别从生态重要性和开发风险性两个角度整合 60 项指标构建了科学全面的指标体系用来对识别出的斑块和廊道进行重要性排序,还确定了重点保护区域斑块和廊道分别占重要性排序结果的比例。

多指标优化法通过构建一系列能体现网络结构优劣的指标或者综合考虑各方面的指标(如:斑块平均面积、斑块密度、形状指数、景观破碎度指数、网络闭合度、成本比<sup>[15]</sup>),并通过设定不同情景对指标进行计算,最后选择符合实际情况且可行性强的优化方案。Dai<sup>[54]</sup>指出城市绿色空间的可达性分析可以通过辨识出城市中绿色空间服务水平不足的区域,从而对城市绿地的优化布局提供科学依据。Kong 等<sup>[55]</sup>在建成区中通过重力模型给出了判断斑块间相互作用的距离阈值,之后结合最小成本路径分析(the least-cost path analysis)和图论(graph theory)确定了最优的生态基础设施网络布局。Teng 等<sup>[56]</sup>将模拟的工程花费引入最小累积阻力模型并综合考虑多种功能,构建了多目标多等级的绿道网络布局,大大增强了结果的实用性。

生态过程法通过综合各种过程模拟模型或构建影响特定生态功能阻力面来判别对这些过程的安全和健康具有关键意义的源和空间联系,确定阈值并划定该功能的适宜安全格局,最后综合多种生态过程得出综合生态安全格局。市域尺度俞孔坚等<sup>[14,22]</sup>在城市规划中提出的“反规划”就是以此为依据,进行不同等级水平的安全格局识别和构建。朱强等<sup>[57]</sup>则基于生态过程原理,总结了处于不同生态过程、承担不同生态功能的生态廊道的宽度要求。建成区内,Zhou 等<sup>[58]</sup>通过流体力学模型对绿色空间释放氧气的扩散过程进行模拟,结合建成区内建筑密度,计算出了应该增加的绿地面积,并对绿地选点和绿网结构进行了规划。周媛等<sup>[59]</sup>综合考虑人口密度、空气污染程度和城市热岛效应强度,利用 GIS 和多目标区位配置模型(LA)对沈阳市三环内城市公园进行了优化选址。

综上所述,属性评价法侧重已有生态基础设施的分级分类和保护,指标选取灵活性和针对性强,评价内容综合性高;但是对于结果的分类分级阈值难以确定、未有统一规范,另外计算过程较为繁琐,构建出的具体模型通用性较差。多指标优化法侧重对新规划的生态基础设施的合理性判断,对于景观指数和图论方法以形成了较为统一的固定流程,计算量不大,可为多情景多目标提供决策依据;但是该方法单纯依赖理论指数值,考虑因素较为单一,景观指数值的实际意义也因尺度变化有不同的解释,另外新增的廊道也只有空间位置的确定,并无廊道宽度的确定标准。生态过程法可根据不同尺度、选择重要的生态过程分析,灵活性好、针对性强,既有对现有生态基础设施的保护建议又有对新增生态基础设施的规划建议,还可以对廊道宽度进行指导;但是在构建模型中,模拟面的阻力值需要人为赋值,缺乏统一赋值标准,另外考虑的过程较多则所需的数据收集量较大、计算较复杂,对使用者的综合要求较高。

## 5 结论与展望

由于城市生态基础设施所涵盖的内容众多、关系复杂,其管理的优劣对于快速城市化进程中城市是否可持续发展具有重要的影响,所以本文以生态基础设施为管理对象,在明确生态基础设施及其管理概念和内涵的基础上,重点综述了其管理原则、现有管理类型与方法、以及管理的关键内容及对应方法等三个方面,并对其中的内容进行了分类,对每类中现有解决方法的优点和缺点进行了分析。

### 5.1 建立健全生态基础设施管理方法体系和内容

在管理方法方面,目前我国还处于生态基础设施管理的摸索期,相关管理方法较为分散,缺乏系统全面的生态基础设施管理体系,也缺乏相应的法律法规。因此,针对生态基础设施管理,形成系统完善的管理体系尤

为重要。在市场引导方面,应努力创新市场引导方式,适当引入第三方监管机制加强对生态基础设施保护与恢复工程的监管力度,尽快制定和完善详细的生态补偿策略。在政策引导方面,应参考借鉴国外土地管理与生态管理的成功经验,并将生态基础设施规划与现有的城市总体规划相互融合、相互补充,同时加速相关科研成果转化为政策指导。在强制性行业标准引导方面,要加强监管力度,严格把控初期和最终评审环节,并对违规项目及其负责人进行严格整改和惩治。

### 5.2 整合多尺度生态基础设施管理研究

在城市范围内,生态基础设施在不同尺度对城市发展及其居民生活发挥的主要功能也有所差异,因而决定其面积形状、空间布局、视觉效果等的影响因素也不同。在市域大尺度,其主要功能是维系自然过程、保持生态安全,如生物多样性保护、保持水土、预防地质灾害发生、调节空气等;而在建成区尺度和社区尺度,其主要功能则是与人紧密相关的,如调节人居环境、降低热岛效应、降低污染和噪声、促进休闲文化、美化视觉景观;不同尺度之间又存在着紧密的逻辑联系<sup>[60]</sup>。因此综合进行多尺度分析,明确不同尺度之间的转换关系,在制定市域尺度生态基础设施数量和空间布局方案的同时,在建成区尺度和社区尺度对其空间布局和质量进行优化,对于城市生态基础设施管理具有重要意义<sup>[61]</sup>。目前这方面研究有待进一步加强。

### 5.3 优化生态基础设施构建方案和方法

对于生态基础设施管理的三个关键问题,本文已在前面论述了现有常见方法模型的优点和存在的问题,并提出了相应的研究建议。另外,作为管理内容的主要组成部分,关于识别生态基础设施核心区、判断生态基础设施合理面积及其最优布局通常是紧密联系、相互影响,但又各有特色。而对于城市的现状格局进行评价和优化、对于城市未来发展的合理规划,都基于此内容。因此,在制定生态基础设施构建方案时,如何理清这些问题的逻辑顺序,每个问题选用何种方法模型、不同问题之间计算的结果是否有冲突、冲突区域如何解决等,都是有待进一步研究的问题。

### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 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.
- [ 2 ] 申金山,宋建民,关柯. 城市基础设施与社会经济协调发展的定量评价方法与应用. 城市环境与城市生态, 2000, 13(5): 10-12.
- [ 3 ] Benedict M A, McMahon E T. Green infrastructure: smart conservation for the 21st century. Renewable Resources Journal, 2002, 20(3): 12-17.
- [ 4 ] 杜士强,于德永. 城市生态基础设施及其构建原则. 生态学杂志, 2010, 29(8): 1646-1654.
- [ 5 ] 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.
- [ 6 ] 尤建新. 城市定义的发展. 上海管理科学, 2006, (3): 67-69.
- [ 7 ] 郝蕊芳,于德永,刘宇鹏,孙云. DMSP/OLS 灯光数据在城市化监测中的应用. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2014, 50(4): 407-413.
- [ 8 ] 丛建辉,刘学敏,赵雪如. 城市碳排放核算的边界界定及其测度方法. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(4): 19-26.
- [ 9 ] 李爱民. 基于遥感影像的城市建成区扩张与用地规模研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2009.
- [ 10 ] 文贡坚,李德仁,叶芬. 从卫星遥感全色图像中自动提取城市目标. 武汉大学学报: 信息科学版, 2003, 28(2): 212-218.
- [ 11 ] 张舞燕,刘清臣,孟秀军. 基于 SAR 相干系数图像的城市边界提取. 测绘与空间地理信息, 2014, 37(5): 56-59.
- [ 12 ] 刘海龙,李迪华,韩西丽. 生态基础设施概念及其研究进展综述. 城市规划, 2005, 29(9): 70-75.
- [ 13 ] 聂法良. 不同管理定义的分析与启示. 青岛科技大学学报: 社会科学版, 2013, 29(2): 74-76.
- [ 14 ] 俞孔坚,王思思,李迪华,李春波. 北京市生态安全格局及城市增长前景. 生态学报, 2009, 29(3): 1189-1204.
- [ 15 ] 孔繁花,尹海伟. 济南城市绿地生态网络构建. 生态学报, 2008, 28(4): 1711-1719.
- [ 16 ] 魏艳,赵慧恩. 我国屋顶绿化建设的发展研究——以德国、北京为例对比分析. 林业科学, 2007, 43(4): 95-101.
- [ 17 ] 吴恒志. 城市生态基础设施规划的探索——以台州市为例. 浙江建筑, 2004, 21(增刊): 17-18, 24-24.
- [ 18 ] 韩文权,常禹,胡远满,李秀珍,布伦仁. 景观格局优化研究进展. 生态学杂志, 2005, 24(12): 1487-1492.
- [ 19 ] Jäppinen J P, Heliölä J. FE 1/2015 Towards a sustainable and genuinely green economy. The Value and social significance of ecosystem services in Finland (TEEB for Finland). Helsinki: The Finnish Ministry of Environment, 2015.
- [ 20 ] Weber T, Sloan A, Wolf J. Maryland's green infrastructure assessment: development of a comprehensive approach to land conservation. Landscape and Urban Planning, 2006, 77(1/2): 94-110.
- [ 21 ] Weber T, Wolf J. Maryland's Green Infrastructure—Using landscape assessment tools to identify a regional conservation strategy. Environmental

- Monitoring and Assessment, 2000, 63(1): 265-277.
- [22] Yu K J. Security patterns and surface model in landscape ecological planning. *Landscape and Urban Planning*, 1996, 36(1): 1-17.
- [23] 俞孔坚, 韩西丽, 朱强. 解决城市生态环境问题的生态基础设施途径. *自然资源学报*, 2007, 22(5): 808-816.
- [24] Brown M A, Southworth F. Mitigating climate change through green buildings and smart growth. *Environment and Planning A*, 2008, 40(3): 653-675.
- [25] Carter T, Keeler A. Life-cycle cost-benefit analysis of extensive vegetated roof systems. *Journal of Environmental Management*, 2008, 87(3): 350-363.
- [26] Oberndorfer E, Lundholm J, Bass B, Coffman R R, Doshi H, Dunnett N, Gaffin S, Köehler M, Liu K K Y, Rowe B. Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services. *BioScience*, 2007, 57(10): 823-833.
- [27] 王小钢. 我国饮用水水源保护区制度浅析. *水资源保护*, 2004, (5): 46-48, 54-54.
- [28] 胡洁, 吴宜夏, 吕璐珊, 李毅, 何伟嘉, 周志华. 奥林匹克森林公园规划设计. *建筑创作*, 2008, (7): 62-71.
- [29] McHarg I L. Human ecological planning at pennsylvania. *Landscape Planning*, 1981, 8(2): 109-120.
- [30] Steiner F, Blair J, McSherry L, Guhathakurta S, Marruffo J, Holm M. A watershed at a watershed: the potential for environmentally sensitive area protection in the upper San Pedro Drainage Basin (Mexico and USA). *Landscape and Urban Planning*, 2000, 49(3/4): 129-148.
- [31] 王森. 基于生态环境与社会经济的生态经济区划研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
- [32] Opdam P, Steingröver E, van Rooij S. Ecological networks: a spatial concept for multi-actor planning of sustainable landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 75(3/4): 322-332.
- [33] Peterseil J, Wrбка T, Plutzer C, Schmitzberger I, Kiss A, Szerencsits E, Reiter K, Schneider W, Suppan F, Beissmann H. Evaluating the ecological sustainability of Austrian agricultural landscapes—the SINUS approach. *Land Use Policy*, 2004, 21(3): 307-320.
- [34] Kupfer J A, Franklin S B. Evaluation of an ecological land type classification system, Natchez Trace State Forest, western Tennessee, USA. *Landscape and Urban Planning*, 2000, 49(3/4): 179-190.
- [35] Hutto C J, Shelburne V B, Jones S M. Preliminary ecological land classification of the Chauga Ridges Region of South Carolina. *Forest Ecology and Management*, 1999, 114(2/3): 385-393.
- [36] Zhang J J, Fu M C, Tao J, Huang Y, Hassani F P, Bai Z K. Response of ecological storage and conservation to land use transformation: a case study of a mining town in China. *Ecological Modelling*, 2010, 221(10): 1427-1439.
- [37] 刘昕, 谷雨, 邓红兵. 江西省生态用地保护重要性评价研究. *中国环境科学*, 2010, 30(5): 716-720.
- [38] 杨志峰, 徐俏, 何孟常, 毛显强, 鱼京善. 城市生态敏感性分析. *中国环境科学*, 2002, 22(4): 360-364.
- [39] 邱彭华, 徐颂军, 谢跟踪, 唐本安, 毕华, 余龙师. 基于景观格局和生态敏感性的海南西部地区生态脆弱性分析. *生态学报*, 2007, 27(4): 1257-1264.
- [40] 李团胜, 石铁矛. 试论城市景观生态规划. *生态学杂志*, 1998, 17(5): 63-67.
- [41] Aydin M B S, Çukur D. Maintaining the carbon-oxygen balance in residential areas: a method proposal for land use planning. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2012, 11(1): 87-94.
- [42] 荣冰凌, 李栋, 谢映霞. 中小尺度生态用地规划方法. *生态学报*, 2011, 31(18): 5351-5357.
- [43] Costanza R, D'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [44] Bolund P, Hunhammar S. Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics*, 1999, 29(2): 293-301.
- [45] Marland G, Pielke Sr R A, Apps M, Avissar R, Betts R A, Davis K J, Frumhoff P C, Jackson S T, Joyce L A, Kauppi P, Katzenberger J, MacDicken K G, Neilson R P, Niles J O, Niyogi D D S, Norby R J, Pena N, Sampson N, Xue Y K. The climatic impacts of land surface change and carbon management, and the implications for climate-change mitigation policy. *Climate Policy*, 2003, 3(2): 149-157.
- [46] Zhang L X, Liu Q, Hall N W, Fu Z. An environmental accounting framework applied to green space ecosystem planning for small towns in China as a case study. *Ecological Economics*, 2006, 60(3): 533-542.
- [47] Uy P D, Nakagoshi N. Application of land suitability analysis and landscape ecology to urban greenspace planning in Hanoi, Vietnam. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2008, 7(1): 25-40.
- [48] Yin K, Zhao Q J, Li X Q, Cui S H, Hua L Z, Lin T. A New Carbon and Oxygen Balance Model Based on Ecological Service of Urban Vegetation. *Chinese Geographical Science*, 2010, 20(2): 144-151.
- [49] Bagliani M, Galli A, Niccolucci V, Marchettini N. Ecological footprint analysis applied to a sub-national area: the case of the Province of Siena (Italy). *Journal of Environmental Management*, 2008, 86(2): 354-364.
- [50] 赵丹, 李锋, 王如松. 基于生态绿当量的城市土地利用结构优化——以宁国市为例. *生态学报*, 2011, 31(20): 6242-6250.
- [51] Li F, Ye Y P, Song B W, Wang R S. Evaluation of urban suitable ecological land based on the minimum cumulative resistance model: a case study

- from Changzhou, China. *Ecological Modelling*, 2015, 318: 194-203.
- [52] 苏泳娴, 张虹鸥, 陈修治, 黄光庆, 叶玉瑶, 吴旗韬, 黄宁生, 匡耀求. 佛山市高明区生态安全格局和建设用地扩展预案. *生态学报*, 2013, 33(5): 1524-1534.
- [53] Pereira M, Segurado P, Neves N. Using spatial network structure in landscape management and planning: a case study with pond turtles. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 100(1/2): 67-76.
- [54] Dai D J. Racial/ethnic and socioeconomic disparities in urban green space accessibility: where to intervene? *Landscape and Urban Planning*, 2011, 102(4): 234-244.
- [55] Kong F H, Yin H W, Nakagoshi N, Zong Y G. Urban green space network development for biodiversity conservation: identification based on graph theory and gravity modeling. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 95(1/2): 16-27.
- [56] Teng M J, Wu C G, Zhou Z X, Lord E, Zheng Z M. Multipurpose greenway planning for changing cities: a framework integrating priorities and a least-cost path model. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 103(1): 1-14.
- [57] 朱强, 俞孔坚, 李迪华. 景观规划中的生态廊道宽度. *生态学报*, 2005, 25(9): 2406-2412.
- [58] Zhou Y, Shi T M, Hu Y M, Gao C, Liu M, Fu S L, Wang S Z. Urban green space planning based on computational fluid dynamics model and landscape ecology principle: a case study of Liaoyang City, Northeast China. *Chinese Geographical Science*, 2011, 21(4): 465-475.
- [59] 周媛, 石铁矛, 胡远满, 高畅, 刘森, 宋琳奇. 基于 GIS 与多目标区位配置模型的沈阳市公园选址. *应用生态学报*, 2011, 22(12): 3307-3314.
- [60] Zetterberg A, Mörtberg U M, Balfors B. Making graph theory operational for landscape ecological assessments, planning, and design. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 95(4): 181-191.
- [61] Jim C Y, Chen S S. Comprehensive greenspace planning based on landscape ecology principles in compact Nanjing city, China. *Landscape and Urban Planning*, 2003, 65(3): 95-116.