

DOI: 10.5846/stxb201805171091

韩林桅, 张淼, 石龙宇. 生态基础设施的定义、内涵及其服务能力研究进展. 生态学报, 2019, 39(19): - .

Han L W, Zhang M, Shi L Y. Definition, connotation and research progress on ecosystem services of ecological infrastructure. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(19): - .

## 生态基础设施的定义、内涵及其服务能力研究进展

韩林桅<sup>1,2</sup>, 张淼<sup>1,2</sup>, 石龙宇<sup>1,\*</sup>

1 中国科学院城市环境研究所 城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021

2 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:**生态基础设施是保持、改善和增加生态系统服务必备的一系列条件和组合,其类型包括城市绿地、湿地、农田、生物滞留池、绿色屋顶等自然和半自然系统,是城市可持续发展的重要保障和支撑。生态基础设施的功能是保障城市生态功能正常运行,并且其居民持续地获得生态服务。本文首先对生态基础设施的定义和内涵进行了辨析,分别从区域与城市/社区尺度对生态基础设施提供的调节服务、支持服务、文化服务和供应服务 4 个方面的生态系统服务进行了梳理,并针对生态基础设施的径流滞蓄、水质净化和气候调节能力与提升技术进行了具体讨论。其次,对生态基础设施服务评估的物质质量评估、价值量评估、能值分析以及模型模拟方法的适用性与局限性进行了总结与比较。最后基于上述分析提出了生态基础设施未来几点研究方向:(1)生态基础设施的多尺度协调规划;(2)基于物联网技术的生态基础设施智能监测体系;(3)基于景感生态学的生态基础设施服务能力综合评估方法。

**关键词:**生态基础设施;生态系统服务;生态系统服务评估;景感生态学

## Definition, connotation and research progress on ecosystem services of ecological infrastructure

HAN Linwei<sup>1,2</sup>, ZHANG Miao<sup>1,2</sup>, SHI Longyu<sup>1,\*</sup>

1 Key Lab of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

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

**Abstract:** Ecological infrastructure is a necessary set of conditions and combinations for maintaining, improving and increasing ecosystem services, including natural and semi-natural systems such as urban green space, wetland, farmland, biological retention pool, green roof, etc., which is the important support and guarantee of urban sustainable development. The core function of ecological infrastructure is to guarantee the normal operation of urban ecological functions and continuous access to ecological services of its residents. The paper first analyzed the definition and connotation of ecological infrastructure, and the ecosystem services provided by ecological infrastructure at regional and urban/community scale were combed from 4 aspects including provisioning services, regulating services, cultural services and supporting services. The services and technologies of runoff retention, water purification, and climate regulation of ecological infrastructure were discussed. Then the applicability and limitations of evaluation methods of ecological infrastructure services including physical, value and energy assessment methods and model simulation were summarized. Finally, the research prospects of ecosystem infrastructure based on ecological service were put forward: (1) The interaction and coordination planning of ecological infrastructure at different scales; (2) Ecological infrastructure intelligent monitoring system based on Internet of Things technology; (3) The comprehensive evaluation methods of ecological infrastructure service based on landsenses

**基金项目:**国家重点研发计划课题(2017YFF02073030);国家自然科学基金(71874174);中国科学院 A 类先导科技专项(XDA23030201)

**收稿日期:**2018-05-17; **网络出版日期:**2019-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lyshi@iue.ac.cn

ecology.

**Key Words:** ecological infrastructure; ecosystem services; ecosystem service evaluation; landscape ecology

生态基础设施(ecological infrastructure,以下简称EI)是针对市政灰色基础设施(如道路、桥梁、铁路、水热、气电输送管线等)、环境基础设施(雨污管网、污水处理厂、垃圾处理厂)和社会基础设施(如医院、学校、文化、体育设施等)而提出的另一种支撑区域/城市可持续发展的必要的基础设施。快速城市化在带来经济发展的同时,也导致了城市人工建筑物以及不透水地面的增加,原有的森林、湿地等自然景观逐渐被取代,进一步导致了城市热岛效应、洪涝灾害、水体富营养化等生态环境问题<sup>[1]</sup>。EI的概念应运而生,其核心功能是提供生态系统服务<sup>[2]</sup>。EI规划、设计和建设通过整合相关的生态过程与景观结构,进而维持、改善和增加生态系统的服务能力。例如在海绵城市的建设过程中,城市生态基础设施通过流量控制、洼地调蓄、滞留、过滤、渗透和生物处理等过程,处理水体污染物及减少地表径流量,可维持和改善生态系统的水量调节以及水质净化服务;通过引入景观生态学的理论和方法,合理进行景观空间规划和设计,可以增加生态基础设施的文化娱乐服务,为城市水环境问题提供综合、系统的解决途径。

本文基于不同类型EI及其生态系统服务的已有研究成果,对不同空间尺度和类型EI所提供的生态系统服务进行了梳理,主要针对EI在径流滞蓄、水质净化和气候调节3个方面的服务能力及提升技术研究进展进行深入探讨,并对现有EI服务能力评估方法进行比较分析,以期对EI的规划、设计、建设和评估提供决策参考。

## 1 EI概念辨析

### 1.1 EI的概念与内涵

EI一词最早见于联合国教科文组织的“人与生物圈计划”(MAB),是MAB年度报告中提出的生态城市规划的五项原则之一,被描述为“natural landscape and natural areas as the framework for spatially organising the city”,主要强调自然景观和腹地对城市的持久支持能力<sup>[3]</sup>。20世纪90年代,景观生态学家和规划师认为EI的重要作用在于将处于日益破碎化的都市景观中孤立的自然区域联结起来,并且北美与欧洲多国的政策与方案均采纳了这种理论。在欧洲,EI经常与生态网络、廊道、保护廊道等进行替换,并且EI规划通常基于特定物种栖息地的要求,包括建设新的自然保护区、廊道等<sup>[4]</sup>。21世纪初期,不同学者对EI进行了定义,主要可以概括为具有维持自然生态过程,更新空气与水体,以及保障居民福利的相互连接的自然生命支持系统<sup>[5-7]</sup>。

在我国,近些年EI的内涵得到了不断的拓展与推广。俞孔坚等<sup>[8]</sup>最早将EI概念应用到中国城市空间规划之中,认为EI从本质上是城市所依赖的自然系统,包含一切能为城市及其居民提供自然服务的城市绿地系统、林业及农业系统、自然保护区系统。李锋等<sup>[1,9]</sup>认为城市EI是指为人类生产和生活提供生态服务的自然与人工设施,并进一步具体将城市EI定义为蓝色(水)、绿色(植被)、灰色(非生物)景观,以及出口(流出、处理或回收)和干线(廊道)在生态系统尺度上的有机整体。在以上关于EI的定义中,一个很重要的方面是将生态系统服务思想与生态结构相结合,使EI的概念更加清晰<sup>[2]</sup>。在总结已有EI概念的基础上,本文将EI定义为保持、改善和增加生态系统服务必备的一系列条件和组合。其类型包括城市绿地、湿地、农田、生物滞留池、绿色屋顶等自然和半自然系统,其主要功能是保障城市生态功能正常运行,并且其居民持续地获得生态服务,是城市可持续发展的基础重要保障和支撑。

### 1.2 EI与绿色基础设施的联系与区别

绿色基础设施(green infrastructure,以下简称GI)最初出现在1994年美国佛罗里达州的土地保护报告中<sup>[5]</sup>,原文解释为“the system of native landscapes and ecosystems that supports native plant and animal species; sustains clean air, water, fisheries, and other natural resources; and maintains the scenic natural beauty that draws people to visit and settle in Florida”<sup>[10]</sup>,强调自然景观与资源保护。1999年,在美国保护基金会(The

Conservation Fund) 和美国农业部林务局(USDA Forest Service)领导下的 GI 工作小组提出了 GI 的定义:“Our nation’s natural life support system—an interconnected network of protected land and water that supports native species, maintains natural ecological processes, sustains air and water resources and contributes to the health and quality of life for America’s communities and people”<sup>[7]</sup>, 强调相互连接的绿色空间网络体系<sup>[11]</sup>。此后,越来越多的研究使用 GI 来描述更广义的生态系统服务,包括作物生产,抵御灾害,娱乐功能等<sup>[12-19]</sup>。

EI 与 GI 概念并无本质区别,但各有侧重。一些学者对两者的概念进行了区分。首先,在概念起源方面,EI 最初常与生态网络、生态廊道等生物多样性保护的常用措施进行替换,强调核心区、廊道等组分对生物多样性的保护作用<sup>[20]</sup>,而 GI 最早出现在美国佛罗里达州土地保护报告中,强调自然景观与资源保护<sup>[4, 21]</sup>。此外,李锋等<sup>[1]</sup>认为 GI 忽略了绿色空间网络与城市市政基础设施以及城市工程建设的耦合,而 EI 将无生命的“灰色基础设施”与有生命的“绿色基础设施”有机整合,形成协同共生、循环再生的基础设施支撑体系。栾博等<sup>[22]</sup>认为 EI 主要以景观生态学理论为基础,强调宏观空间格局的连通性与完整性,但一定程度上忽视了格局内部的绿色空间质量,而 GI 兼顾空间战略和实施技术。本文认为 GI 侧重于空间连通性,强调水系、绿道等组成的网络对城市发展的支撑能力;而 EI 侧重于系统性和完整性,从生态系统的水、土、气、声、风等全要素协同角度维持、改善和提高城市的生态系统服务功能。

目前 EI 与 GI 两者的内涵已经逐渐趋同<sup>[2]</sup>,都具有提供生态系统服务的生命支持系统的涵义<sup>[22]</sup>,并且呈现多目标、多功能的趋势<sup>[2]</sup>。大多数文章中 EI 和 GI 所指代的内涵已经接近一致,因此本文中对二者并未进行严格的区分。

## 2 EI 的主要服务功能及提升技术

生态系统服务一般指生态系统和生态过程所形成和维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用<sup>[23, 24]</sup>。EI 是城市居民获得生态系统服务的基本保障,目前已有学者对 EI 提供的生态系统服务进行了讨论<sup>[1, 9, 17, 25-28]</sup>。由于人类从生态系统获利的大小与生态系统的时空尺度有着密切的关系,因此对于不同尺度 EI 服务功能的研究可以为 EI 的评价与规划指导提供更为清晰明确的依据。如李锋等<sup>[1]</sup>从区域和城市/社区 2 个尺度对 EI 及其提供的生态系统服务进行了划分。此外,Bolund 等<sup>[25]</sup>指出一种 EI 可以提供多种生态服务。本文在已有研究基础上,从区域和城市/社区 2 个尺度,以及调节服务、支持服务、文化服务、供应服务 4 个方面对 EI 提供的生态系统服务进行了总结(表 1)。并结合目前城市化过程中面临的市内涝、水污染与热岛效应等主要问题,重点对 EI 的径流滞蓄、水质净化和气候调节服务能力以及提升技术进行了讨论。

表 1 EI 提供的生态系统服务

Table 1 Ecosystem services of EI

生态系统服务类型 Types of ecosystem services		EI 类型 Types of EI
调节服务(区域) Regulating services (regional scale)	区域气候调节、空气质量调节、碳汇、水循环和净化	自然森林、湿地、湖泊、草原
调节服务(城市) Regulating services (urban/community scale)	微气候调节、空气质量调节、水质净化、侵蚀预防和土壤肥力、生物控制、防止噪声	城市森林、交通绿化带、农田、小型水体和溪流、绿色屋顶、雨水花园、雨水湿塘、渗透沟渠、可渗透铺装
文化服务(区域) Cultural services (regional scale)	娱乐和生态旅游、精神和宗教、审美体验和灵感、教育、文化遗产	长距离步道、风景名胜、国家公园、文化产地
文化服务(城市) Cultural services (urban/community scale)	心理和身体健康、审美体验和灵感、文化价值观和提供信息、教育、励志、场所感	城市森林、城市公园、休闲地、街心绿地、小型水体和溪流、喷泉、屋顶花园
支持服务 Supporting services	野生动物栖息地、土壤形成、养分循环	自然森林、湿地、湖泊、草原、风景名胜、国家公园
供应服务 Provisioning services	物质资源、淡水、遗传资源	城市森林、农田、小型水体和溪流、城市公园、街心绿地、交通绿化带、屋顶花园

## 2.1 EI 的径流滞蓄功能与提升技术

### 2.1.1 EI 的径流滞蓄功能研究进展

城市建设将大量自然可渗透地面转变为硬化的不透水地面,改变了生态系统原有的自然水循环,造成地表径流系数的增加<sup>[29]</sup>。城市绿地、湿地、透水性铺装等 EI 可以对城市硬化地面进行改造,利用植被覆盖区域的活地被物和腐殖质层增加雨水下渗量及下渗速度,或利用下凹式绿地等结构形态对雨水进行缓存、渗蓄,调控降雨-径流关系,减少径流量,延长汇流时间。研究表明,城市地区的植被覆盖可以将径流系数从 60%降低到 5%—15%<sup>[29]</sup>。英国大曼彻斯特的模拟实验发现,居民区绿地覆盖增加 10%可减少地表径流的 4.9%,再增加 10%类似绿地覆盖,可减少地表径流的 5.7%<sup>[30]</sup>。

### 2.1.2 EI 径流滞蓄功能提升技术研究进展

目前,EI 径流滞蓄功能提升技术主要包括植被种类选择、填料基质筛选与 EI 结构坡度设计等。

#### (1) 植被种类选择

植被的抗旱能力和持水性能是主要的选择标准,并且要考虑植被在不同气候条件下的适宜性。一些学者认为高度更高、直径更大以及茎、根部生物量更大的植被具有更好的持水性能<sup>[31]</sup>,并且有研究对不同气候条件下适宜的植被种类进行了总结,以亚洲为例,芦苇、灯草、香蒲属和荸荠属植被较为常见,景天属植物因为其抗旱能力被广泛应用在世界范围内的简单式绿色屋顶中。

#### (2) 基质填料筛选

在基质中添加有机物、增加基质层深度均可以增加绿色屋顶的雨水保留率从而减小雨水径流。研究发现,在基质中添加有机物质可以提高基质的持水性能。有研究表明,在 10cm 深的矿渣基质中添加 40%(体积比)的生物炭可以额外蓄存 2.3cm 的雨水<sup>[32]</sup>,硅酸盐颗粒和水凝胶也可以显著提高矿渣基质或碎屋顶陶瓦的持水性能<sup>[34]</sup>。此外,Getter 等<sup>[31]</sup>提出基质厚度和植物种类的匹配是绿色屋顶成功实施的重要条件。美国密歇根州中南部对 25 种肉质植物进行的 7 年追踪实验发现稳定的植被群落出现在 2.5cm 厚的基质层条件下<sup>[34]</sup>。

#### (3) EI 结构坡度设计

减小屋顶坡度等措施可以增加绿色屋顶的雨水保留率从而减小雨水径流,植被、基质、结构坡度等要素间不同组合的径流滞蓄效果是主要的研究趋势。有研究表明,减小屋顶坡度和基质层深度可以明显减少雨水径流量,在所有实验情景中 4cm 基质深度和 2%坡度的屋顶具有最大的雨水保留率<sup>[35]</sup>。

## 2.2 EI 的水质净化功能与提升技术

### 2.2.1 EI 的水质净化功能研究进展

城市屋顶、道路、停车场等不透水地面上附集了多种污染物,在降雨过程中这些不透水地面促进了地表径流的形成,并携带污染物最终进入河流、地下水等接纳水体。人工湿地、雨水花园、绿色屋顶等 EI 利用植物、微生物、基质等的过滤、吸附或生物化学等过程,对污水或雨水在流入接纳水体前进行截留滞蓄,并对 C、N、P 等营养物质以及悬浮物、病原体等进行去除,从而达到水质净化的效果。已有研究证明,生物滞留池、人工湿地等 EI 对于悬浮物、营养物质、碳氢化合物和重金属以及与人类健康密切的病原细菌、药物等具有显著的去除效果<sup>[36-37]</sup>。人工湿地通常可以去除生活污水中 80—99%的有机物、92—95%的细菌、30—80%的 N 和 20—70%的 P<sup>[38]</sup>。埃及开罗北部污水处理厂附近种植有美人蕉、芦苇和塞浦路斯草纸莎草的垂直人工湿地对 COD、BOD 和 TSS 的平均去除率分别达到 88%、90%、92%<sup>[40]</sup>。

### 2.2.2 EI 水质净化功能提升技术研究进展

影响 EI 污染物去除效率的主要影响因素包括水文状况、进水方式、植被和填料选择等。

#### (1) 水文状况调节技术

水文状况影响生物群落的组成和生物化学过程,以及污染物的迁移。目前对于水质净化功能的研究对象主要为人工湿地,增加水力停留时间、选择批量进水方式可以通过增加接触时间和曝气促进对污染物的降解

作用。研究表明,足够的水力停留时间是对污染物进行充分处理与去除的基本保障<sup>[37]</sup>,并且过快的径流速率可能会使沉积物中的污染物再次悬浮<sup>[40]</sup>。此外,批量进水方式可以通过增加曝气进而促进生物降解作用,因此相比连续进水方式对药物等污染物的去除效果更为显著<sup>[37]</sup>。近年来利用浮动介质反应器和电化学方法去除污染物的研究逐渐增多。

### (2) 植被选择技术

高吸附能力是植被的选择标准,可以根据不同的污染类型选择不同吸附性能的植被。一些学者认为植被对于 TN、TP 的去除率分别处于 14.29—51.89% 和 10.76—34.17% 的水平<sup>[41]</sup>。有研究表明金沙草和六角莲对人工湿地中的重金属具有良好的吸附性能<sup>[43]</sup>。

### (3) 基质选择技术

复合基质以及生物炭、有机质等添加剂可以提高基质的吸附性能。基质的选择标准主要为高渗透系数和吸附能力,因为低渗透性可能会导致系统堵塞,低吸附能力也会影响基质对污染物的长期净化效果。目前基质主要包括天然材料、人工材料和工业废料 3 种类型<sup>[41]</sup>,并且废弃物等经济、环保的材料越来越受欢迎。工业废料中明矾污泥的使用较为广泛,对 P 具有较强的吸附能力,1g 干污泥可以吸附 14.3mg P<sup>[43]</sup>。在人工湿地中,相比碎石、大理石和沸石,铁渣是最好的除 P 材料<sup>[39]</sup>。复合基质由于其具有微生物附着的活性表面以及高渗透系数,因此吸附能力一般优于单一基质。在基质中混合添加剂也可以提高吸附效果,例如添加生物炭的人工湿地对 COD、TN、NH<sub>3</sub>、NO<sub>3</sub>-N、TP、PO<sub>4</sub> 的去除效果相比仅使用砾石的人工湿地显著提高<sup>[38]</sup>。护根、可可泥炭、海藻等有机质也可以提高基质对重金属的吸附效果。此外,有研究证明浮动介质反应器或者电化学装置可以提高对 TN、TP 的去除效果<sup>[44-46]</sup>。

## 2.3 EI 的气候调节功能与提升技术

### 2.3.1 EI 的气候调节功能研究进展

EI 可以通过遮阳以及植物蒸腾和雨水蒸发作用等缓解城市热岛效应。研究表明城市公园的平均温度相比无绿化区域低 1℃<sup>[47]</sup>,英国曼彻斯特的案例研究证明若高密度居民区和城镇中心的绿地面积增加 10%,可以避免未来 80 年内大约 4℃ 的温度增加<sup>[30]</sup>。此外,绿色屋顶对太阳辐射的反射率为 0.7-0.85,相比沥青、焦油和砾石屋顶 0.1-0.2 的反射率,可以大大降低有效太阳辐射<sup>[48]</sup>。

### 2.3.2 EI 的气候调节功能提升技术研究进展

增加太阳辐射反射率以及水分蒸发蒸腾量有助于加强 EI 对热岛效应的缓解作用。目前 EI 气候调节功能的研究对象主要为绿色屋顶与可渗透路面。

#### (1) 绿色屋顶设计技术

绿色屋顶气候调节功能的主要影响因素包括植被、基质以及灌溉与排水系统。其中植被的生长状况决定了绿色屋顶建设的成功与否<sup>[31]</sup>。由于屋顶并不是植被理想的生存环境,因此植被的耐旱、耐贫瘠、快速繁殖、无需维护等特征成为主要选择标准。景天属在简单式绿色屋顶(以草坪、地被、小型灌木和攀援植物等为主的绿色屋顶)中被广泛使用,7cm 的基质足以维持其生长<sup>[32]</sup>。水苏属的冷却性能明显优于大多数物种,对叶片表面冷却能力比景天属高 5℃、可对冠层下方的基质冷却 12℃,对冠层上方的空气冷却 1℃<sup>[49]</sup>。并且多种植被的混合种植可以加强绿色屋顶的实施效果。在基质的选择方面,除了基质的持水性能对于水分蒸发量的影响,基质的持水性能、吸附能力以及基质的体积、深度对基质中水分和养分的影响也会进一步影响植被的生长状况。此外,目前对于排水系统的使用增加,主要有排水板和排水颗粒材料两种类型,可以为绿色屋顶系统提供水气平衡。研究显示在没有排水管的绿色屋顶设计中,雨水的蒸发量变大,带来的降温效果更加明显<sup>[50]</sup>。而灌溉系统可以增加绿色屋顶的蒸发量从而提高绿色屋顶的降温效果。

#### (2) 可渗透路面设计技术

可渗透路面的气候调节功能主要通过增加路面水分蒸发量和减少太阳辐射吸收量来实现,主要措施为在路面材料中添加高热容材料增加表面蓄热能力或透水/保水性添加剂增加蒸发水量,以及增加路面反照率或

增加植被或人工遮阳设备来减少对太阳辐射的吸收量<sup>[51]</sup>。

综合以上分析, EI 的径流滞蓄、水质净化和气候调节服务能力主要受到植被、基质填料以及 EI 结构与运行方式的影响。此外, EI 的服务能力还与当地气候、降雨等因素相关。例如绿色屋顶在炎热干燥的气候条件下对热岛效应的调节效果最好, 并且在夜晚的调节效果优于白天, 可以实现 1.58℃ 的降温<sup>[48]</sup>。在对北欧绿色屋顶实施效果的模拟研究中, 景天属植被在最寒冷潮湿地区的最佳储水能力为 25mm, 而在较为温暖干旱地区的最佳储水能力为 40—50mm<sup>[52]</sup>。并且在 EI 的长期实施过程中, 基质填料可能会发生堵塞问题而影响对污染物的吸附效果。因此, 加强对不同气候区开展长期的野外实验与监测有利于对 EI 在实际条件中的服务能力进行准确评估。

### 3 EI 生态系统服务能力评估

EI 是多种生态系统服务的提供者, 对 EI 的生态系统服务能力进行有效评估, 并将评估结果与城市规划管理与项目设计等相结合, 是世界各国城市正在探索和实践的重要课题<sup>[28]</sup>。目前已有学者对城市森林、绿地、湿地、湖泊、防护林、公园等 EI 的服务能力进行了评估, 评估方法主要包括物质量评估法、价值量评估法、能值评估法以及模型模拟法。

#### 3.1 物质量评估法

物质量评估法直接用物质量大小来衡量生态系统服务水平, 可以分为功能价值法(基于单位生态系统服务功能价格的方法)和当量因子法(基于单位面积价值当量因子的方法)2 类<sup>[53]</sup>。功能价值法利用 EI 的资源资料或监测数据、面积和相应的生态学参数对生态系统服务所形成或提供的各种实物量进行定量评估; 当量因子法通过构建不同类型生态系统服务的价值当量, 然后乘以生态系统的分布面积得出价值总量<sup>[53]</sup>。我国学者谢高地结合国内外的研究, 建立了基于专家知识的生态系统服务价值评估体系, 提出了“中国陆地生态系统服务价值当量因子表”<sup>[54]</sup>。功能价值法建立了环境变量与 EI 服务价值之间的相关关系, 计算过程较为复杂, 对数据要求高, 适用于小区域范围; 当量价值法操作过程简单, 对数据要求小, 但当量因子表主要基于专家知识建立, 主观性较强, 适用于区域和全球尺度的 EI 服务能力评估。

#### 3.2 价值量评估法

价值量评估法通过货币衡量生态系统服务价值, 常用的评估方法可以分为直接市场价值法、替代市场价值法和假象市场价值法<sup>[55-57]</sup>(表 2)。直接市场价值法用于生态系统服务中可以直接在交易中体现的价值的评估, 又分为市场价值法和费用支出法。替代市场价值法以“影子价格”和消费者剩余来表达生态服务的经济价值, 包括替代成本法、影子工程法、机会成本法、旅行费用法等; 假象市场价值法以支付意愿来表达生态服务功能的经济价值, 主要有条件价值法。一般对没有市场交易的生态系统服务功能价值采用替代市场价值法, 对既没有直接市场交易, 也没有替代产品进行换算的生态系统功能服务采用假象市场价值法。在实际评估工作中, 针对不同的生态系统服务特点选取合适的方法。如姜刘志等<sup>[58]</sup>采用替代成本法、影子工程法等对深圳市福田区城市绿地的土壤保持、涵养水源、环境净化、固碳释氧、调节气候、维持生物多样性、景观游憩等 7 项生态服务价值进行评价。荆贝贝等<sup>[59]</sup>利用市场价值法、影子工程法和条件价值法等, 定量评估了防护林带的净化大气环境、调节温湿度和涵养水源等 15 项生态系统服务价值。此外, EI 的休闲文化服务价值日益受到关注, 主要采用条件价值法进行评估<sup>[60]</sup>。直接市场价值法具有实际的市场价格, 核算较为客观、但需要足够的实物数据和市场数据等作为支撑; 替代市场价值法对数据的要求较低, 但计算出来的价值通常是巨大的, 不具备市场运行条件; 假象市场价值法从消费者角度进行评估, 解决了直接市场和替代市场数据缺乏的问题, 但存在主观性较强、结果不稳定等问题<sup>[23, 61]</sup>。

#### 3.3 能值分析法

能值分析理论最早由国际生态学者 Odum 提出, 以太阳能为评价标准, 将各种形式的物质和能量通过一定的换算系数转化成太阳能当量, 从而确定 EI 的服务价值<sup>[53]</sup>。已有学者利用能值分析方法对城市森林、河

流、湖泊、沼泽、水库等的生态系统服务价值进行了评估<sup>[53, 62]</sup>。能值分析法具有计算简单、资料获取容易,并且量纲统一、热力学方法严密性等优点,但更适用于核算来自太阳能、风能等自然生态系统的贡献方面,对文化服务价值的评估较为薄弱<sup>[63]</sup>。能值转换率是能值分析的重要参数,然而目前研究使用的能值转换率在来具有优势适合较大范围区域的能值分析,对于较小区域或个体的能值分析,其研究适用性和能值数据可得性都值得商榷<sup>[53]</sup>。此外,不同区域生产水平的差异决定人类经济产品的能值转换率有较大差别,因此能值指标的选择和确定需要与研究区域的经济投入与产出相关联,在具体实践中不断地修正和完善<sup>[53]</sup>。

表 2 价值量评估各方法比较

Table 2 Comparison of different value assessment methods

价值量评估方法 Value assessment methods	描述 Description	举例 Examples
直接市场价值法 Direct marketing value method	市场价值法	先定量评价某种生态服务的效果,再根据这些效果的市场价格评估其经济价值,又分为环境效果评价法和环境损失评价法
	费用支出法	以消费者对某种生态服务的支出费用表示其经济价值
替代市场价值法 Replacement of marketing value method	替代成本法	通过某些产品或服务的替代品的花费来估算其经济价值
	影子工程法	以替代工程建造费用进行估算
	机会成本法	通过资源其他利用方案可能获得的最大利益(损失)估计该方案的价值
	旅行费用法	指将人们在旅游消费时付出的交通费、时间等代价作为生态系统服务的价值
假象市场价值法 Pseudo marketing value method	享乐价值法	通过人们为相关商品支付的意愿评估生态系统的服务价值
	条件价值法	通过调查问卷方式得到消费者在假想市场中体现的生态系统服务的支付意愿

### 3.4 模型模拟法

模型模拟法是通过通过对生态系统过程和机理的充分理解建立模型,输入所需的生物物理等数据计算 EI 的服务能力生态系统服务。这些模型均有各自的适用范围和局限性。由美国斯坦福大学“Natural Capital”项目组开发的 InVEST 模型可根据土地利用/覆被图的时空变化来模拟陆地生态系统碳储量、农作物产量、生境质量和稀有性等生态系统服务功能的动态变化,并用可视化表达直观地体现了人类活动对生境的威胁程度和影响范围<sup>[1]</sup>,适用于区域和城市尺度<sup>[64]</sup>,是生态系统服务评估发展最成熟、应用最多的模型<sup>[63]</sup>;由美国林务局设计和开发的 i-Tree 模型可以用来量化和评估城市树木和森林所提供的污水净化、碳固定、减少碳排放、控制雨水径流等生态系统服务,包含 i-Tree Eco, i-Tree Landscape, i-Tree Hydro 等 7 种不同应用程序<sup>[65]</sup>,被广泛应用于国内外城市林地的研究中。相比 INVEST 模型, i-Tree 模型的研究尺度相对灵活,可适用于街区场地等小尺度<sup>[64]</sup>,国内有学者运用 i-TREE 对城市行道树、林地等的生态效益进行了评估<sup>[66-67]</sup>; VER 模型(Ecological Value at Risk)可以将生态服务价值的量化与生态风险分析的数学模型相结合,侧重于生态服务价值的生态风险分析研究<sup>[1]</sup>。此外, SWMM 模型为常用的雨水管理模型,其中的 LID(Low-impact development, 低影响开发)模块可用于植草沟、绿色屋顶等 8 种低影响开发措施在某次降水事件或长期的水量和水质模拟<sup>[68]</sup>。模型模拟法的优点在于可移植性,不受空间尺度和时间限制,可以根据不同年份的动态数据进行不同场景下的评估分析,并且弥补了单纯计算对生态系统服务空间分布不均匀性的忽略,但是计算过程需要更加全面的数据支持和对模型的运用限制因素的充分了解。

目前对 EI 服务能力的主要评估方法是先对 EI 的物质质量或功能量进行量化,之后运用市场价值法、替代成本法、机会成本法等计算其价值量<sup>[29]</sup>,少数研究利用模型对区域生态服务功能进行定量评估。城市生态系

统的栖息地面积较小、生态价值相对较低,并且人工湿地、城市公园等半自然生态系统相比自然生态系统具有自身特色,既模仿自然生态系统又具有较为明确的实施目标,因此在价格设定原则上不可直接照搬天然生态系统的价格。吴佳妮<sup>[69]</sup>采用市场价值法设定了绿色基础设施经济价值的评估模型,并将评价指标分为自然设施(天然森林、天然湿地、草原、湖泊)和半自然设施(人工林、人工湿地、水库、城市绿地面积)两类,将半自然设施的单位价值设定为自然设施单位价值的 50%。此外,目前对 EI 服务能力的评估主要从生态服务提供者即城市生态系统的角度进行直接度量,而从生态服务接收者即城市居民的角度,根据人类对生态服务的感知进行间接度量的研究较少。EI 的规划建设一方面依据生态学原理,更重要的是依据城市居民对 EI 服务功能的感知和认知规律,满足城市居民的多方面需求<sup>[70]</sup>。因此加强居民对 EI 服务能力的感知和满意度的研究可以为 EI 的规划与设计提供重要参考。

#### 4 研究展望

EI 的主要功能是保障城市生态功能正常运行,并且其居民持续地获得生态系统服务。自 EI 概念提出至今,EI 规划、设计、建设与评估技术得到不断改进和完善。但现有研究中仍然存在一些问题,例如缺少不同尺度 EI 之间的相互作用研究,长期野外实验与实地监测较少,基于居民主观视角的 EI 服务能力评估较少等。基于前文分析提出未来 EI 的几点研究方向:

(1) EI 的多尺度协调规划。不同尺度 EI 的内涵与提供的生态系统服务具有一定的差异,针对性的规划方法对于保证 EI 的实施极为重要。区域尺度上的环境问题都源于小尺度上的现象与过程,而大尺度上的改变也会影响小尺度的现象和过程<sup>[71]</sup>,因此应在对不同尺度 EI 的服务功能与相互作用机制进行深入分析的基础上制定连续、系统的多层次规划格局,如俞孔坚等<sup>[72]</sup>分别从宏观尺度( $>100\text{km}^2$ )的总体规划、中观尺度( $>10\text{km}^2$ )的控制性规划以及微观尺度( $<10\text{km}^2$ )的修建性规划对浙江台州市的 EI 进行了综合设计<sup>[2]</sup>。

(2) 基于物联网技术的 EI 生态系统服务能力智能监测体系。EI 的径流滞蓄、水质净化、气候调节等服务能力受区域气候、降雨等多种因素影响。此外,EI 作为一个区域或城市的生态基底,其空间范围是由自然与人工系统的空间耦合情况决定的,不同的地物类型具有不同的生态服务功能,同一要素也会因为所处空间属性的不同而拥有明显不同的生态服务功能<sup>[73]</sup>。因此,有必要对典型气候区与发展阶段的 EI 服务能力进行现场监测,对 EI 的实际雨水截留率,N、P 等污染物的去除率与降温效果等进行准确的量化<sup>[74]</sup>。物联网、无线网等各种传输网络可以将城市主要 EI 监测数据实时传送到后台进行海量存储,并在综合考虑区域地形地貌与植被覆盖的基础上,通过计算、数据挖掘和模拟分析,实现对水资源(流量)、水环境(COD、溶解氧、氨氮、浊度、水温等)、土壤(湿度、渗透系数等)和微气候(温度、湿度等)的实时在线监测,形成针对性与实时性应用的智能反馈系统,从而为城市面源污染治理和 EI 维护提供更为准确的决策支持,最大程度发挥 EI 的服务能力。

(3) 基于景感生态学的 EI 服务能力评估方法。EI 模拟自然生态系统结构,主要目的是为城市居民提供生态系统服务。当前研究主要从生态系统角度对 EI 服务能力进行客观评估,对城市居民的主观感知和满意度的调查相对较少。景感生态学是指以可持续发展为目标,基于生态学的基本原理,从自然要素、物理感知、心理感知、社会经济、过程与风险等相关方面,研究土地利用规划、建设与管理的科学<sup>[75]</sup>。城市居民是 EI 规划建设的真正利益相关者,采用景感生态学的理论和方法,从物理和心理等方面全方位地评价居民对城市环境的满意程度,将居民的共同感知目标融入 EI 规划,可以为 EI 建设提供更加丰富、全面的数据类型与决策依据,最大程度发挥 EI 的服务功能<sup>[76]</sup>。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] 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, (01), 190-200.
- [ 2 ] 刘海龙,李迪华,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), 5.
- [ 3 ] UNESCO, UNEP, USSR State Committee for Science and Technology. International Experts Meeting on Ecological Approaches to Urban Planning. Suzdal: USSR, 1984.

- [ 4 ] Ahern J. Greenways as a planning strategy. *Landscape & Urban Planning*. 1995, 33(1-3), 131-155.
- [ 5 ] Silva J M C D, Wheeler E. Ecosystems as infrastructure. *Perspectives in Ecology and Conservation*. 2017, 15(1), 32-35.
- [ 6 ] Bryant M M. Urban landscape conservation and the role of ecological greenways at local and metropolitan scales. *Landscape & Urban Planning*. 2006, 76(1-4), 23-44.
- [ 7 ] Benedict M A, McMahon E T. Green infrastructure: smart conservation for the 21st century. *Renewable Resources Journal*. 2002, 20(3), 12-17.
- [ 8 ] 俞孔坚, 李迪华, 潮洛蒙. 城市生态基础设施建设的十大景观战略. *规划师*. 2001, 17(6), 9-17.
- [ 9 ] Li F, Liu X S, Zhang X L, Zhao D, Liu H X, Zhou C B, Wang R S. Urban ecological infrastructure: an integrated network for ecosystem services and sustainable urban systems. *Journal of Cleaner Production*. 2017, 163, 12-18.
- [ 10 ] Commission F G. Creating a statewide greenways system. For people... for wildlife...for Florida. Tallahassee, 1994.
- [ 11 ] 王春晓. 西方城市生态基础设施规划设计的理论与实践研究[D]. 北京:北京林业大学, 2015.
- [ 12 ] Bowler D E, Buyung-Ali L, Knight T M, Pullin A S. Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*. 2010, 97(3), 147-155.
- [ 13 ] Wolch J R, Byrne J, Newell J P. Urban green space, public health, and environmental justice: The challenge of making cities 'just green enough'. *Landscape and Urban Planning*. 2014, 125, 234-244.
- [ 14 ] Roy S, Byrne J, Pickering C. A systematic quantitative review of urban tree benefits, costs, and assessment methods across cities in different climatic zones. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2012, 11(4), 351-363.
- [ 15 ] Andersson E, Barthel S, Borgstrom S, Colding J, Elmqvist T, Folke C, Gren A. Reconnecting Cities to the Biosphere: Stewardship of Green Infrastructure and Urban Ecosystem Services. *Ambio*. 2014, 43(4), 445-453.
- [ 16 ] Matthews T, Lo A Y, Byrne J A. Reconceptualizing green infrastructure for climate change adaptation: Barriers to adoption and drivers for uptake by spatial planners. *Landscape and Urban Planning*. 2015, 138, 155-163.
- [ 17 ] Tzoulas K, Korpela K, Venn S, Yli-Pelkonen V, Kazmierczak A, Niemela J, James P. Promoting ecosystem and human health in urban areas using Green Infrastructure: A literature review. *Landscape and Urban Planning*. 2007, 81(3), 167-178.
- [ 18 ] Demuzere M, Orru K, Heidrich O, Olazabal E, Geneletti D, Orru H, Bhawe A G, Mittal N, Feliu E, Faehle M. Mitigating and adapting to climate change: Multi-functional and multi-scale assessment of green urban infrastructure. *Journal of Environmental Management*. 2014, 146, 107-115.
- [ 19 ] 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.
- [ 20 ] Li F, Wang R S, Paulussen J, Liu X S. Comprehensive concept planning of urban greening based on ecological principles: a case study in Beijing, China. *Landscape and Urban Planning*. 2005, 72(4), 325-336.
- [ 21 ] 乔青, 陆慕秋, 袁弘. 生态基础设施理论与实践. *风景园林*. 2013, (2), 38-44.
- [ 22 ] 栾博, 柴民伟, 王鑫. 绿色基础设施研究进展. *生态学报*. 2017, 37(15), 5246-5261.
- [ 23 ] 赵景柱, 肖寒, 吴刚. 生态系统服务的物质量与价值量评价方法的比较分析. *应用生态学报*. 2000, (02), 290-292.
- [ 24 ] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价. *应用生态学报*. 1999, (5), 635-640.
- [ 25 ] Bolund P, Hunhammar S. Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics*. 1999, 29(2), 293-301.
- [ 26 ] Prudencio L, Null S E. Stormwater management and ecosystem services: a review. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(3): 033002.
- [ 27 ] 刘滨谊, 张德顺, 刘晖, 戴睿. 城市绿色基础设施的研究与实践. *中国园林*. 2013, (3), 6-10.
- [ 28 ] 张伟, 杰克·艾亨, 刘晓明. 生态系统服务评估在美国城市绿色基础设施建设中的应用进展评述. *风景园林*. 2017, (2), 101-108.
- [ 29 ] 张彪, 谢高地, 薛康, 王金增, 肖玉, 张灿强. 北京城市绿地调蓄雨水径流功能及其价值评估. *生态学报*. 2011, 31(13), 3839-3845.
- [ 30 ] Gill S E, Handley J F, Ennos A R, Pauleit S. Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure. *Built environment*. 2007, 33(1), 115-133.
- [ 31 ] Vijayaraghavan K. Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2016, 57, 740-752.
- [ 32 ] Cao C T N, Farrell C, Kristiansen P E, Rayner J P. Biochar makes green roof substrates lighter and improves water supply to plants. *Ecological Engineering*. 2014, 71, 368-374.
- [ 33 ] Farrell C, Ang X Q, Rayner J P. Water-retention additives increase plant available water in green roof substrates. *Ecological Engineering*. 2013, 52, 112-118.
- [ 34 ] Rowe D B, Getter K L, Durhan A K. Effect of green roof media depth on Crassulacean plant succession over seven years. *Landscape and Urban Planning*. 2012, 104(3-4), 310-319.
- [ 35 ] Vanwoert N D, Rowe D B, Andresen J A, Rugh C L, Fernandez R T, Xiao L. Green Roof Stormwater Retention. *Journal of Environmental Quality*.

- 2005, 34(3), 1036-1044.
- [36] Davis A P, Hunt W F, Traver R G, Clar M. Bioretention Technology: Overview of Current Practice and Future Needs. *Journal of Environmental Engineering-Asce*. 2009, 135(3), 109-117.
- [37] Zhang D Q, Ni W D, Gersberg R M, Ng W J, Tan S K. Performance Characterization of Pharmaceutical Removal by Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands Using Multivariate Analysis. *Clean-Soil Air Water*. 2015, 43(8), 1181-1189.
- [38] Ayaz S C, Aktas O, Findik N, Akca L. Phosphorus removal and effect of adsorbent type in a constructed wetland system. *Desalination and Water Treatment*. 2012, 37(1-3), 152-159.
- [39] Abou-Elela S I, Hellal M S. Municipal wastewater treatment using vertical flow constructed wetlands planted with Canna, Phragmites and Cyprus. *Ecological Engineering*. 2012, 47, 209-213.
- [40] Chen H J. Surface-Flow Constructed Treatment Wetlands for Pollutant Removal: Applications and Perspectives. *Wetlands*. 2011, 31(4), 805-814.
- [41] Wu H M, Zhang J, Ngo H H, Guo W S, Hu Z, Liang S, Fan J L, Liu H. A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation. *Bioresource Technology*. 2015, 175, 594-601.
- [42] You S H, Zhang X H, Liu J, Zhu Y N, Gu C. Feasibility of constructed wetland planted with *Leersia hexandra* Swartz for removing Cr, Cu and Ni from electroplating wastewater. *Environmental Technology*. 2014, 35(2), 187-194.
- [43] Zhao X H, Zhao Y Q. Investigation of phosphorus desorption from P-saturated alum sludge used as a substrate in constructed wetland. *Separation and Purification Technology*. 2009, 66(1), 71-75.
- [44] Chang N B, Crawford A J, Wanielista M. Field-scale evaluation of floating media bed reactor for nutrient treatment in a wet detention pond. // *International Low Impact Development Conference 2015; LID: It Works in All Climates and Soils*. 2015; 142-150.
- [45] Chang N B, Wanielista M, Marimon Z. Comparative Evaluation of Floating Treatment Wetlands for Nutrient Removal and Algal Toxin Control in Wet Detention Ponds//*International Low Impact Development Conference 2015; LID: It Works in All Climates and Soils*. 2015; 168-175.
- [46] Gao Y, Xie Y W, Zhang Q, Wang A L, Yu Y X, Yang L Y. Intensified nitrate and phosphorus removal in an electrolysis-integrated horizontal subsurface-flow constructed wetland. *Water Research*. 2017, 108, 39-45.
- [47] Koc C B, Osmond P, Peters A. Evaluating the cooling effects of green infrastructure: A systematic review of methods, indicators and data sources. *Solar Energy*. 2018, 166, 486-508.
- [48] Berardi U, GhaffarianHoseini A, GhaffarianHoseini A. State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy*. 2014, 115, 411-428.
- [49] Blanus T, Monteiro M M V, Fantozzi F, Vysini E, Li Y, Cameron R W. Alternatives to Sedum on green roofs: Can broad leaf perennial plants offer better 'cooling service'? *Building and Environment*. 2013, 59, 99-106.
- [50] Zaremba G J, Traver R G, Wadzuk B M. Impact of Drainage on Green Roof Evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2016, 142(7), 04016022.
- [51] Santamouris M. Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island-A review of the actual developments. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2013, 26, 224-240.
- [52] Johannessen B G, Hanslin H M, Muthanna T M. Green roof performance potential in cold and wet regions. *Ecological Engineering*. 2017, 106, 436-447.
- [53] 潘鹤思, 李英, 陈振环. 森林生态系统服务价值评估方法研究综述及展望. *干旱区资源与环境*. 2018, 32(6), 72-78.
- [54] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. *自然资源学报*. 2015, 30(08), 1243-1254.
- [55] 赵金龙, 王泳鑫, 韩海荣, 康峰峰, 张彦雷. 森林生态系统服务功能价值评估研究进展与趋势. *生态学杂志*. 2013, 32(8), 2229-2237.
- [56] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 肖玉, 鲁春霞. 中国生态系统服务的价值. *资源科学*. 2015, 37(9), 1243-1254.
- [57] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价. *应用生态学报*. 1999, 10(5), 6.
- [58] 姜刘志, 杨道运, 梅岑岑, 班远冲, 杨小毛. 城市绿地生态系统服务功能及其价值评估——以深圳市福田区为例. *华中师范大学学报(自然科学版)*. 2018, 52(03), 8.
- [59] 荆贝贝, 张希金, 李晓旭, 涂克环, 达良俊. 宁波余姚市防护林带生态系统服务功能价值评估. *西北林学院学报*. 2016, 31(04), 6.
- [60] 王甫园, 王开泳, 陈田, 李萍. 城市生态空间研究进展与展望. *地理科学进展*. 2017, 36(2), 207-218.
- [61] 赵文武, 刘月, 冯强, 王亚萍, 杨思琪. 人地系统耦合框架下的生态系统服务. *地理科学进展*. 2018, 37(1), 13.
- [62] Huang S L, Chen Y H, Kuo F Y, Wang S H. Energy-based evaluation of peri-urban ecosystem services. *Ecological Complexity*. 2011, 8(1), 38-50.
- [63] 李丽, 王心源, 骆磊, 冀欣阳, 赵燕, 赵颜创, Bachagha N. 生态系统服务价值评估方法综述. *生态学杂志*. 2018, 37(4), 1233-1245.
- [64] 韩依纹, 戴菲. 城市绿色空间的生态系统服务功能研究进展: 指标、方法与评估框架. *中国园林*. 2018, 34(10), 6.

- [65] Baro F, Chaparro L, Gomez-Baggethun E, Langemeyer J, Nowak D J, Terradas J. Contribution of Ecosystem Services to Air Quality and Climate Change Mitigation Policies: The Case of Urban Forests in Barcelona, Spain. *Ambio*. 2014, 43(4), 466-479.
- [66] 马宁, 何兴元, 石险峰, 陈玮. 基于 i-Tree 模型的城市森林经济效益评估. *生态学杂志*. 2011, 30(04), 810-817.
- [67] 张玉阳, 周春玲, 董运斋, 王远森. 基于 i-Tree 模型的青岛市南区行道树组成及生态效益分析. *生态学杂志*. 2013, 32(07), 1739-1747.
- [68] Lee J G, Selvakumar A, Alvi K, Riverson J, Zhen J X, Shoemaker L, Lai F H. A watershed-scale design optimization model for stormwater best management practices. *Environmental Modelling & Software*. 2012, 37, 6-18.
- [69] 吴佳妮. 我国绿色基础设施的经济价值测算与分析. *重庆工商大学学报(社会科学版)*. 2018, 35(2), 32-39.
- [70] 陈爽, 王丹, 王进. 城市绿地服务功能的居民认知度研究. *人文地理*. 2010, 25(04), 55-59, 151.
- [71] 吕一河, 傅伯杰. 生态学中的尺度及尺度转换方法. *生态学报*. 2001, 21(12), 2096-2105.
- [72] 张宏锋, 欧阳志云, 郑华. 生态系统服务功能的空间尺度特征. *生态学杂志*. 2007, (9), 1432-1437.
- [73] 朱恒楝, 李锋, 刘红晓, 叶亚平. 城市生态基础设施辨识与模型构建:以广州市增城区为例. *生态科学*. 2016, (3), 118-128.
- [74] Karteris M, Theodoridou I, Mallinis G, Tsiros E, Karteris A. Towards a green sustainable strategy for Mediterranean cities: Assessing the benefits of large-scale green roofs implementation in Thessaloniki, Northern Greece, using environmental modelling, GIS and very high spatial resolution remote sensing data. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2016, 58, 510-525.
- [75] Zhao J Z, Liu X, Dong R C, Shao G F. Landsenses ecology and ecological planning toward sustainable development. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*. 2016, 23(4), 293-297.
- [76] 石龙宇, 赵会兵, 郑拴宁, 于天舒, 董仁才. 城乡交错带景感生态规划的基本思路与实现. *生态学报*. 2017, 37(06), 2126-2133.