

理解生态规划设计本质：水生态基础设施研究进展述评

张静，曹冠宇（中国建筑西南设计研究院有限公司，成都 610041）

【摘要】在快速城市化和全球气候变化背景下，关于水生态、水安全、水环境的问题受到持续关注。水生态基础设施作为一种基础性空间结构，在维持生态系统过程稳定、为人类提供生态系统服务、保障生物栖息地完整等方面发挥着重要作用。在阐明了生态基础设施和水生态基础设施内涵基础上，比较了相关概念提出背景和意义，提出了使用水生态基础设施来统称相关概念的观点。综述了水生态基础设施的主要研究方向，包括水生态基础设施规划、雨洪管理、气候变化应对、绩效评估、传统智慧和经验。通过对水生态基础设施未来研究的展望，对生态规划设计本质进行了分析和阐释，提出了“闭合生态过程”的规划设计策略。

【关键词】水生态；生态基础设施；生态系统服务；规划设计

在城市化进程中，我国的生态城市建设正面临着一系列水资源问题，包括洪涝旱灾、水污染、水生态系统退化等^{[1][2]}。不透水下垫面的增加，改变了自然原有水文循环特征和生态基础设施面积；生物栖息地减少使生态系统服务功能全面退化。本文试图从水生态基础设施研究为切入点，探究其在生态城市建设中作为一种可以惠及所有居民的策略之内涵。梳理国内外研究前沿动态，阐释生态规划设计本质，从而认识水生态基础设施规划设计对科学推进生态文明建设具有重要意义。

1 水生态基础设施内涵

1.1 生态基础设施概念的起源与发展

国际上最早于 1984 年首次提出了生态基础设施（Ecological Infrastructure, EI）概念，并总结了生态城市规划五原则：1、生态保护战略；2、生态基础设施；3、居民生活标准；4、文化历史保护；5、将自然引进城市^[3]。上个世纪 90 年代，生态基础设施概念可与绿道、生态网络、廊道等术语互换使用^{[4][5]}。2000 年之后生态基础设施的理论与实践在我国得到了快速发展，其被认为是城市所依赖的自然系统，是城市 and 居民可以持续获得生态系统服务的基础，不仅包括了传统的城市绿地系统概念，还涵盖了林业、农业、自然保护地等^{[3][6][7]}。

1.2 水生态基础设施概念的提出

水生态基础设施（Hydro-ecological Infrastructure）被认为是一个生命体，是保障水系统综合生态系统服

务为目标的基础性空间结构（景观格局），不仅包括自然水生态系统，也包括生态化的水工基础设施^[8]。对于水生态基础设施认识应包括两个方面：广义的水生态基础设施与生态基础设施基本同义，因为几乎所有生态基础设施在向居民提供生态系统服务的同时都伴随着各种水过程的进行；而对其狭义的理解则是指河流、湿地、生物滞留池等与水有最直接关系的自然或人工系统，强调生态基础设施对水生态、水安全、水环境等的作用，相似的概念有蓝色基础设施（Blue Infrastructure）^{[9][10][11]}、绿色雨水基础设施（Green Stormwater Infrastructure, GSI）^{[12][13][14][15]}、蓝绿基础设施（Blue and Green Infrastructures, B&GI）^{[16][17][18]}、湿地生态基础设施^[19]。本文讨论主要针对水生态基础设施的狭义概念。

1.3 相关概念梳理

Frischenbruder 等在描述巴西圣保罗建立基础设施网络来应对洪水威胁时，首次提出了蓝色基础设施概念，之后这一概念常被用在雨洪管理、栖息地恢复、湿地和海岸线系统等的保护规划中^{[9][10]}。李锋等把城市生态基础设施定义为蓝色（基于水的）、绿色（基于植被的）和灰色（无生命的）基础设施的有机整合^[11]。

绿色基础设施（Green Infrastructure, GI）是野生动物栖息地、开放空间以及其他可以持续提供自然资源的区域所组成的网络^[20]。绿色基础设施始于上世纪 90 年代美国马里兰州绿道计划，发展于美国多个州的绿道建设热潮，以绿图计划（Green Print Program）实施为标志，2000 年后其理论和实践进入

表 1 相关概念对比

| 概念 Concept | 提出时间 Proposed time | 定义 Definition | 用途 Use | 代表人物或机构 Representative figure or institution |
|---|-----------------------|---|---------------------|---|
| 生态基础设施 Ecological Infrastructure | 1984 | 城市所依赖的自然系统，是城市居民可以持续获得生态系统服务的基础，不仅包括了传统的城市绿地系统概念，还涵盖了林业、农业、自然保护区等 | 生态城市规划五原则之一 | UNESCO, Mander, Selm |
| 绿色基础设施 Green Infrastructure | 1990s | 野生动物栖息地、开放空间以及其他可以持续提供自然资源的区域所组成的网络 | 动物保护和其他自然资源区域的保护规划 | The Conservation Fund and USDA Forest Service |
| 绿色雨水基础设施 Green Stormwater Infrastructure | 1990s | 采用自然系统或模拟自然的人工系统的产品、技术和措施 | 保证区域整体的环境质量和提供有效的服务 | EPA |
| 蓝色基础设施 Blue Infrastructure | 2006 | 可以应对洪水威胁等的基础网络，城市生态基础设施的组成部分 | 雨洪管理、湿地和海岸线系统等的保护规划 | Frischenbruder, Pellegrino, 李锋 |
| 水生态基础设施 Hydro-ecological Infrastructure | 2015 | 一个生命体，不仅包括自然水生态系统，也包括生态化的水工基础设施 | 保障水系统综合生态系统服务 | 俞孔坚 |

资料来源：笔者整理^{[9]~[19]} 自绘

成熟阶段，随后这一概念的研究在英国、加拿大、中国等多个国家全面展开，成为景观设计学、生态学等学科的前沿热点^{[19][21]}。从国际上已有的研究和其概念看，生态基础设施与绿色基础设施可以认为同义^[3]。绿色雨水基础设施则一般是指雨水花园、绿色屋顶、生物调节池、滞留池等水文低影响开发措施^{[12][13][14]}，相似的概念还有蓝绿基础设施。

由此可知，与水生态基础设施概念相似或相同的概念较多，其提出背景和使用范围也有不同。本文不着重辨析各概念之间的差别，而是从这些概念的共性内涵出发，统称为水生态基础设施，关注它们的研究进展。这主要出于以下三点原因：1) “水”，即其是关于水的。这些基础设施是对水安全、水资源、水环境、水生态等过程有极为重要意义的。2) “生态”，即其可以持续提供生态系统服务，包括调节干旱与洪水、保护水源、保护生物多样性等^[22]。3) 传统意义的“基础设施”一般指可以给社会带来福利的人造资产^[5]。在此使用“基础设施”这一概念，旨在强调其生态系统服务可以公平地惠及整个社会，而且是不可替代的人类资产。更重要的是，这些“基础设施”的建设和管理成本往往很少，即其是低成本、低维护、高效益的。

2 研究进展

2.1 水生态基础设施规划

最早的水生态基础设施规划雏形可以追溯到 19 世纪末建成的波士顿“翡翠项链”（Emerald Necklace）项目，其将公园、湿地、绿地等连接成系统，为城市创造了可持续的绿色空间。20 世纪 60 年代，环境保护运动的兴起使人们意识到生态的重要意义，McHarg 以生态学知识为基础，应用地图叠加法，完成了伍德兰德新镇等一系列规划项目。这些项目以其鲜明的“设计遵从自然”（Design with Nature）原则为之后的规划实践指明了道路。20 世纪 80 年代后，得益于景观生态学、岛屿生物地理学和异质种群动态理论的发展，生态（绿色）基础设施的最佳格局被认为是由廊道连接的高质量栖息地枢纽组成^[23]。一般方法是基于对景观进行多目标的战略性规划，识别生态敏感或对生物保护、雨洪过程起决定作用的区域，形成可以持续提供生态系统服务的土地和水的网络。具体来讲，生态（绿色）基础设施的规划方法可以分为：1) 基于生态学的垂直生态过程的“千层饼”法，即前文 McHarg 所使用的方法；2) 基于景观生态学的水平生态过程分析方法；3) 基于图论和网络分析的空间分析法；4) 基于几何生态学的形态学空间格局分析法^[23]。近年来，中国^[22]、美国^[24]、澳大利亚^[25]等多个国家出现了大量的理论研究和实践。比较有代表性的是“绿色基础设施评估法”和“景观安全格局途径”。“绿色基础设施评估法”通过对开发因素和生态因素的博弈评估，识别一系列枢纽（hub）和

廊道 (corridor) 所组成的绿色基础设施网络来实现土地保护^[26]。俞孔坚等将“景观安全格局途径”作为规划和建设生态基础设施的方法,提出“反规划”理念,并在国土、区域和城市等多个空间尺度进行了大量规划设计实践^[27]。刘滨谊等则将绿色基础设施的规划总结为场地、城市和乡村及特殊人居环境,并对不同尺度场地的绿色基础设施规划进行了讨论,指出我国绿色基础设施在规划层面上功能单一等问题^[28]。

传统的自上而下规划模式习惯从宏观角度思考景观战略布局,但这种方法对人的感受和人对景观认知的考虑较少。近年来,学界出现了一系列自下而上的绿色基础设施规划方法^[29]旨在应对这一规划困境。比较有代表性的是综合价值认知拼图法,其是蓝绿基础设施规划的一种途径,可以增加各利益方对人、生态和场地的理解^[30],类似方法还有公共参与地理信息系统方法 (PPGIS)^[31]。

2.2 雨洪管理

城市下垫面硬化面积扩大使雨水难以快速下渗,场地雨水径流总量和径流峰值显著增大,降雨初期的面源污染使城市黑臭水体发生概率增加。另一方面,传统灰色基础设施作为“补救”手段收纳雨水,却使下游甚至整个流域水文状态失调,雨水作为一种废弃物被快速从场地中排走,其被认为可能对环境造成不利影响^[32]。绿色基础设施在应对雨洪问题上具有突出优势,其可在降雨全周期中对场地雨水径流进行控制,并且有益于整个流域的水文健康运行。伴随着美国低影响开发 (LID)、英国可持续城市排水系统 (SUDS) 等技术体系的发展,绿色雨水基础设施径流总量和峰值控制^[33]及其类型和规模^[34]选择出现了大量研究。美国多个城市已将超过雨水控制计划预算的 20% 用于绿色雨水基础设施建设^[35]。费城更是实施了一项为期 25 年的计划,旨在通过减少综合下水道溢流量来改善当地河流和溪流的水质,其主要方案就是建设绿色雨水基础设施^[36]。

2.3 气候变化应对

多项研究表明水生态基础设施还有助于应对气候变化。这些研究主要集中在水生态基础设施调节城市温度、降低二氧化碳排放等功能。Mander 通过研究发现保护和恢复生态基础设施可以在流域尺度增加一定的水量,有助于应对气候变化和缓解水资源短缺^[37]。蓝色基础设施被认为可以减少城市的热负荷,其冷却效率取决于建筑的类型、一天中的时间和水温^[38]。Kanniah 等的研究发现建设蓝色和绿色基础设施是实

现城市二氧化碳低排放的战略之一。在距离如湖泊这样的蓝色基础设施 100m 的位置,温度会增加约 1.7 度,空气湿度则会降低 9%^[39]。Bowditch 等认为在气候变化对水资源产生重大影响时,最有效的水资源适应方式就是保护自然水文过程,减少土地利用和基础设施发展的影响^[40]。

2.4 绩效评估

水生态基础设施的绩效评估研究主要有两个方向。第一,定量模拟研究。包括对水文和水质过程建模,模拟不同流动模型、颗粒运输情况以及溶解吸附反应等^[41],对金属化合物滞留效率定量研究^[42]。在法国,Multi-Hydro 平台被用来定量模拟蓝绿基础设施建设的影响,发现如果其大量建设可以减少 90% 的径流量^[47]。其他研究表明绿色雨水基础设施是有效的下水道溢流控制技术,可以有效降低雨水径流总量、径流事件频率和污染物负荷等^{[12][43]}。第二,水生态基础设施对人类健康的影响。已经有研究表明暴露于蓝色空间可以促进健康和预防疾病^[44]。树木等绿色基础设施有相当多的证据表明其对人类健康有益^[45],但关于绿色雨水设施对健康影响的研究还较少。对绿色雨水基础设施接触的类型、剂量、频率等对健康的影响是未来的研究趋势^[44]。

2.5 传统智慧和经验

为了应对现代城市水问题带来的挑战,越来越多的学者将注意力放在水生态基础设施传统经验,试图以传统智慧来解决目前面临的问题。这些对古代水生态基础设施的研究主要可以分为以下几个方面。其一,关于古代城镇防洪。吴庆洲对唐宋元明清城市防洪排涝系统进行了研究,总结了古城防洪经验^[46]。俞孔坚等系统研究了黄泛平原古城镇应对洪涝灾害的经验,总结了古代城市针对洪水干旱而形成的特点^[47]。其二,关于传统村落水生态基础设施。如黔东南寨水井、堰塘、排水渠等传统水生态基础设施研究^[48],传统聚落水环境的生态营造研究^[49],徽州传统村落水资源利用研究^[50],关中传统村镇旱涝平衡研究^[51]。其三,关于水资源利用传统经验。如陕北地域传统雨水利用研究^[52],陂塘景观在雨洪调节、水质净化、雨水利用等过程中的作用^[53],以及对陂渠、圩垸、井灌等传统灌溉工程技术的研究^[54]。比较有代表性的是三峡消落带的生态修复案例,生态学者综合使用林泽-基塘复合系统、陂塘小微湿地等传统水生态基础设施策略,用最小投入解决了生态缓冲、面源污染净化、生物栖息地提供等问题^[55]。

关于水资源利用的传统智慧表现在生活、生产、农业活动中,这些经验是源于当地特有自然地理环境,是在长期面对残酷自然条件过程中的总结,是解决当代多重水问题的地方方案。古人在水资源管理和水资源利用等方面的经验与智慧集中体现在了其一系列水适应性景观建设中^[56]。这些关于水生态基础设施的传统智慧经过了长时间的考验,但在目前的建设中却很少汲取经验^[57],大量的传统水生态基础设施还缺乏系统研究。

3 研究展望

3.1 基本概念的综合

在任何研究领域,作为研究出发原点的基本概念的定义都显得尤为重要。一般来说,在相关领域发展初期,不同学者或机构由于学术背景或研究侧重点的不同可能提出各类表意相近的名词,但到了学科发展成熟阶段就有必要对各类学术名词进行梳理规范。规范且定义明确的基本概念对学术交流和学科健康发展、研究传承等都有重要意义。正如前文所述,已有文献中出现了多个与水生态基础设施意义相近的概念,如蓝色基础设施、绿色雨水基础设施、蓝绿基础设施等。部分文献为表达相近的意义提出了不同的学术名词。本文建议用水生态基础设施来统一这些概念,不仅可以突出这些基础设施对于自然和人类的重要意义,也会促进学术交流更加准确且有效率。同时,应该明确的是学术基本概念规范明确应是该领域学者经过充分沟通、辨析、商议之后所达成的共识,故呼吁尽快召开基本概念或名词规范的学术研讨会。

3.2 对水生态基础设施的全面认识

虽然有多项研究证明水生态基础设施的优势,绿色基础设施也被认为是在财政紧缩情况下将雨水管理与城市复兴相联系的重要手段^[58],但认知局限等原因仍使美国的绿色基础设施实践进展缓慢^[32]。相似的情况也发生在英国,蓝绿基础设施的推广也存在障碍^[18]。实际上,研究表明绿色基础设施并不能代替灰色基础设施在雨水管理上的地位,而应该是有力的补充^{[59][60][61]},它们的组合可能会对水质提供更具有成本效益的改善^[62]。打破实际应用中的障碍,促进水生态基础设施的发展需使全社会更加全面认识其对生态系统和人类的意义。

3.3 理解生态规划设计本质

目前关于水问题的解决可以归纳为两条途径,其一是基于现代科技的生化方法或设备等的处理方法,

其二是基于传统智慧的水生态基础设施建设方法。需要明确的是现代科技方法往往是单一目标的,存在“盲区”,且很多时候对自然的扰动是不可逆的;而传统智慧技术往往具有低成本、低维护的特点,是人长期适应自然的经验结果,对自然是低扰动且是可逆的。笔者认为对于基于传统智慧的水生态基础设施的系统研究可以使规划设计者更加理解生态的本质,为可持续的设计提供思路。

本文以一种典型的基于传统智慧的水生态基础设施—桑基鱼塘为例进行分析。桑基鱼塘主要出现在我国珠江三角洲,其塘基种桑树,桑叶再养蚕,蚕沙作为池塘养鱼的饲料,塘泥再堆基种树(图1)。

桑基鱼塘景观的原理是一个闭合的生态过程。在整个生态过程中,没有使用系统外的化学肥料或饲料,且具有明显的经济效益和生态效益。其经济效益主要表现在桑、蚕和鱼的产出,而生态效应主要体现在雨洪调蓄以及促进动植物资源循环利用,维持生态平衡等方面。近年来,有学者通过对桑基鱼塘进行系统研究,将其原理应用在了水生态基础设施的建设中,比较有代表性的是林泽-基塘复合系统建设^[63](图2)。可以看到,林泽-基塘复合系统的原理仍然是一个闭合的生态过程,其通过在夏季出露期和冬季淹没期的巧妙设计解决了面源污染、稳定护岸、生物栖息地等一系列问题。

以上两种系统的设计虽然只是简单地通过挖填方重塑场地,但却蕴含了经典的生态学原理—边缘效应。边缘效应认为在两个生物地理群落交界之处,其结构复杂,存在多种生境,种群密度也变化较大^[64]。桑基鱼塘和林泽-基塘复合系统利用工程措施使水陆交界面积增加,边缘效应增强,生物多样性增加,生态系统得到了持续巩固。整个系统不仅具有美学价值,而且是丰产稳定的景观。

对水生态基础设施和生态规划设计本质进行进一步思考,可以发现区别于某些虚假生态景观做法(如

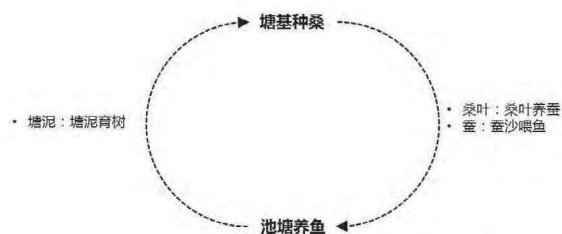


图1 桑基鱼塘原理: 闭合的生态过程
资料来源: 笔者自绘

表 2 两种生态景观的对比

| | 虚假的生态景观 Fake ecological landscape | 真实的生态景观 Real ecological landscape |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 表现形式 Form | 大草坪等 | 桑基鱼塘、林泽 - 基塘等水生态基础设施 |
| 评价标准 Evaluation standard | 视觉效果 | 生态学原理 |
| 实质 Essence | 景观背后断裂的生态过程 | 景观背后完整闭合的生态过程 |
| 绩效结果 Performance result | 耗费大量的水资源和化学肥料 | 经济效益和生态效益 |
| 与资源的关系 Relationship with resource | 资源的消费者 | 资源的生产者 |

资料来源：笔者自绘

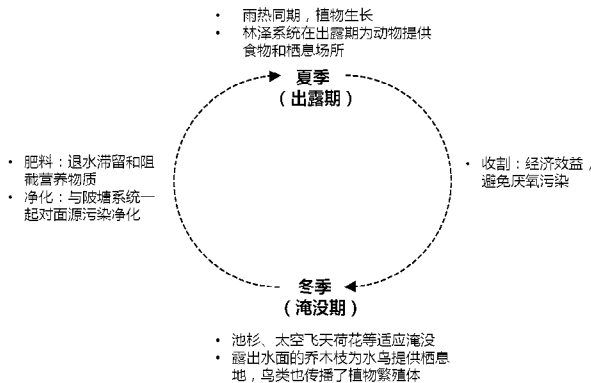


图 2 林泽 - 基塘复合系统原理：闭合的生态过程

资料来源：笔者整理^[63] 自绘

缺水地区出现的大草坪等），以桑基鱼塘和林泽 - 基塘等水生态基础设施为代表的真实生态景观的共同点是背后完整闭合的生态过程。真实生态景观是以生态学和景观生态学原理为评价标准，是生态过程的结果，是资源的生产者，具有经济效益和生态效益；而虚假生态景观的评价标准则是视觉效果，隐藏的是断裂的生态过程，耗费大量的水资源和化学肥料，是资源的消费者（表 2）。

综上，面对今天的环境问题，“闭合生态过程”应该成为最重要的生态规划设计策略之一。这里所说的“闭合生态过程”并不是指“食物链”或“人工闭合生态系统”概念。“食物链”中存在生产者、消费者和分解者三类，且在很多时候也是循环闭合的，但其更多强调的是摄食关系和能量循环关系。桑基鱼塘里的鱼塘可能就存在多条食物链，比如藻—水蚤—鱼—水鸟等。而“人工闭合生态系统”则是指利用生态学理论，完全由人工建立的封闭生态系统，多在科学试验中构建。本文提出的“闭合生态过程”策略则是从整体观认识生态，利用生态学原理从空间（如桑基与鱼塘，林泽系统和基塘系统）以及时间（如夏季出露期和冬季淹没期）两个维度进行规划设计，使系统可以持续健康稳定运行，实现功能和美学的双重目标。

基于此，未来水生态基础设施有三个方向的研究应该加强：其一，绩效评估，包括水生态基础设施对人类健康的影响、雨洪管理的绩效、使用者对规划设计感知等；其二，运用更加宏观的视野对水生态基础设施从空间和时间两个维度进行分析，对其进行全面认识；其三，传统智慧和经验的研究。相对于标准化的现代工程措施，传统智慧和经验可以为水生态基础设施建设提供更多基于地方经验的启发，构建闭合的生态过程，实现对真实生态景观的诉求，真正实现让自然做功，这也是生态规划设计的本质所在。

参考文献

- [1] 王浩. 协同合作缓解中国水资源问题 [J]. 景观设计学, 2017 (1): 40-47.
- [2] 俞孔坚, 李迪华, 袁弘, 等. “海绵城市”理论与实践 [J]. 城市规划, 2015, 39(6):26-36.
- [3] 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 [J]. 城市规划, 2005, 29(9):70-75.
- [4] Ahern J. Greenways as a planning strategy [J]. Landscape & Urban Planning, 1995, 33(1-3):131-155.
- [5] Silva J M C D, Wheeler E. Ecosystems as infrastructure [J]. Perspectives in Ecology & Conservation, 2017, 15(1):32-35.
- [6] 俞孔坚, 李迪华. 论反规划与城市生态基础设施建设 [C]// 杭州城市绿色论坛论文集. 北京: 中国美术学院出版社, 2002.
- [7] 俞孔坚, 李迪华. 城乡生态基础设施建设 [Z]. 中华人民共和国建设部, 建设事业技术政策纲要, 2004, 115-124.
- [8] 俞孔坚. 水生态基础设施构建关键技术 [J]. 中国水利, 2015(22):1-4.
- [9] Frischenbruder M T M, Pellegrino P. Using greenways to reclaim nature in Brazilian cities [J]. Landscape & Urban Planning, 2006, 76(1):67-78.
- [10] Edwards P E T, Sutton-Grier A E, Coyle G E. Investing in nature: Restoring coastal habitat blue infrastructure and green job creation [J]. Marine Policy, 2013, 38(1):65-71.
- [11] Li F, Liu X, Zhang X, et al. Urban ecological infrastructure: An integrated network for ecosystem services and sustainable urban systems [J]. Journal of Cleaner

- Production, 2017, 163:S12-S18
- [12] Vanaskie M J, Smullen J, Rajan R, et al. Reducing Pollutant Loads from Philadelphia's Combined Sewer System with Green Stormwater Infrastructure[J]. Proceedings of the Water Environment Federation, 2012, 2012(5): 952-965.
- [13] Kondo M C, Low S C, Henning J, et al. The Impact of Green Stormwater Infrastructure Installation on Surrounding Health and Safety[J]. American Journal of Public Health, 2015, 105(3):114-21.
- [14] Suppakittpaisarn P, Jiang X, Sullivan W C. Green Infrastructure, Green Stormwater Infrastructure, and Human Health: A Review[J]. Current Landscape Ecology Reports, 2017, 2(4):96-110.
- [15] 车伍, 张伟, 王建龙, et al. 低影响开发与绿色雨水基础设施——解决城市严重雨洪问题措施[J]. 建设科技, 2010(21):48-51.
- [16] Thome C R, Lawson E C, Ozawa C, et al. Overcoming uncertainty and barriers to adoption of Blue-Green Infrastructure for urban flood risk management[J]. Journal of Flood Risk Management, 2015.
- [17] Versini P A, Kotelnikova N, Poulhes A, et al. A distributed modelling approach to assess the use of Blue and Green Infrastructures to fulfil stormwater management requirements[J]. Landscape & Urban Planning, 2018, 173:60-63.
- [18] O' Donnell E C, Lamond J E, Thome C R. Recognising barriers to implementation of Blue-Green Infrastructure: a Newcastle case study[J]. Urban Water Journal, 2017, 14(9): 964-971.
- [19] 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[J]. 生态学报, 2014, 34(1):190-200.
- [20] Benedict M A, McMahon E T. GREEN INFRASTRUCTURE: SMART CONSERVATION FOR THE 21ST CENTURY[J]. Renewable Resources Journal, 2002, 20(3):12-17.
- [21] 栾博, 柴民伟, 王鑫. 绿色基础设施研究进展[J]. 生态学报, 2017, 37(15):5246-5261.
- [22] 俞孔坚, 王思思, 李迪华, 等. 北京城市扩张的生态底线——基本生态系统服务及其安全格局[J]. 城市规划, 2010(2):19-24.
- [23] 裴丹. 绿色基础设施构建方法研究述评[J]. 城市规划, 2012(5):84-90.
- PEI Dan. Review of Green Infrastructure Planning Methods [J]. City Planning Review, 2012(5): 84-90.
- [24] Lauren M. Inclusion of Knowledge Communities in Planning Processes: An Analysis of Green Infrastructure Planning in Maryland USA[J]. Dissertations & Theses - Gradworks, 2012.
- [25] Kilbane S. Green infrastructure: planning a national green network for Australia[J]. Journal of Landscape Architecture, 2013, 8(1):64-73.
- [26] Weber T, Sloan A, Wolf J. Maryland's Green Infrastructure Assessment: Development of a comprehensive approach to land conservation[J]. Landscape & Urban Planning, 2006, 77(1-2):0-110.
- [27] 乔青, 陆慕秋, 袁弘. 生态基础设施理论与实践 北京大学景观设计学研究院相关研究综述 [J]. 风景园林, 2013, 20: 38-44.
- [28] 刘滨谊, 张德顺, 刘晖, 等. 城市绿色基础设施的研究与实践 [J]. 中国园林, 2013(3):6-10.
- [29] Perini K, Sabbion P. Bottom - Up Initiatives for Green and Blue Infrastructure [M]// Urban Sustainability and River Restoration: Green and Blue Infrastructure. John Wiley & Sons Ltd, 2016:177.
- [30] Kati V, Jari N. Bottom-up thinking—Identifying socio-cultural values of ecosystem services in local blue-green infrastructure planning in Helsinki, Finland [J]. Land Use Policy, 2016, 50:537-547.
- [31] Raymond C M. Integrating multiple elements of environmental justice into urban blue space planning using public participation geographic information systems[J]. Landscape & Urban Planning, 2016, 153:198-208.
- [32] Dhakal K P, Chevalier L R. Managing urban stormwater for urban sustainability: Barriers and policy solutions for green infrastructure application[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 203: 171-181.
- [33] Eaton, Timothy T. Approach and case-study of green infrastructure screening analysis for urban stormwater control[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 209:495-504.
- [34] Jayasooriya V M, Muthukumaran S, Ng A W M, et al. Multi Criteria Decision Making in Selecting Stormwater Management Green Infrastructure for Industrial areas Part 2: A Case Study with TOPSIS[J]. Water Resources Management, 2018(8):1-16.
- [35] Hopkins K G, Grimm N B, York A M. Influence of governance structure on green stormwater infrastructure investment[J]. Environmental Science & Policy, 2018, 84:124-133.
- [36] Maakestad S C, Macdonald H M. Green Stormwater Infrastructure Design: Lessons Learned in Philadelphia[J]. Proceedings of the Water Environment Federation, 2013, 2013(12):4680-4690.
- [37] Mander M, Jewitt G, Dini J, et al. Modelling potential hydrological returns from investing in ecological infrastructure: Case studies from the Bavianskloof-

- Tsitsikamma and uMngeni catchments, South Africa[J]. *Ecosystem Services*, 2017, 27:261-271.
- [38] M. Žuvela-Aloise, Koch R, Buchholz S, et al. Modelling the potential of green and blue infrastructure to reduce urban heat load in the city of Vienna[J]. *Climatic Change*, 2016, 135(3-4):425-438.
- [39] Kanniah K D, Sheikhi A, Kang C S. Exploring the role of green and blue infrastructure in reducing temperature in Iskandar Malaysia using remote sensing approach[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (EES). 2014, 18(1).
- [40] Bowditch K, Wood J. Adapting to Climate Change with Green Infrastructure: Opportunities in the Charies River Watershed[J]. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2010, 2010(2):15-32.
- [41] Massoudieh A, Maghrebi M, Kamrani B, et al. A flexible modeling framework for hydraulic and water quality performance assessment of stormwater green infrastructure[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2017, 92:57-73.
- [42] Kabir M I, Daly E, Maggi F. A review of ion and metal pollutants in urban green water infrastructures[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 470:695-706.
- [43] Pennino M J, McDonald R I, Jaffe P R. Watershed-scale impacts of stormwater green infrastructure on hydrology, nutrient fluxes, and combined sewer overflows in the mid-Atlantic region.[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 565:1044-1053.
- [44] Grellier J, White M P, Albin M, et al. BlueHealth: a study programme protocol for mapping and quantifying the potential benefits to public health and well-being from Europe's blue spaces[J]. *Bmj Open*, 2017, 7(6).
- [45] Jiang B, Chang C Y, Sullivan W C. A dose of nature: Tree cover, stress reduction, and gender differences[J]. *Landscape & Urban Planning*, 2014, 132:26-36.
- [46] 吴庆洲. 中国古城防洪的历史经验与借鉴[J]. *城市规划*, 2002, 26(4).
- [47] 俞孔坚, 张蕾. 黄泛平原古城镇洪涝经验及其适应性景观[J]. *城市规划学刊*, 2007(5):85-91.
- [48] 吴丹. 黔东南邝扒村水生态基础设施规划设计研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学硕士学位论文, 2017.
- [49] 孙贝. 中国传统聚落水环境的生态营造研究[D]. 北京: 中央美术学院, 2016.
- [50] 陈旭东. 徽州传统村落对水资源合理利用的分析与研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
- [51] 徐岚, 雷振东. 关中传统村镇旱涝平衡经验及其当代规划启示[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 49(130):111-117.
- [52] 李甜. 陕北地域传统雨水利用智慧及其现代应用研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- [53] 俞孔坚, 姜芊孜, 王志芳, 等. 池塘景观研究进展与评述[J]. *地域研究与开发*, 2015.
- [54] 张芳. 中国传统灌溉工程及技术的传承和发展[J]. *中国农史*, 2004, 23(1):10-18.
- [55] 袁兴中, 杜春兰, 袁嘉, 等. 适应水位变化的多功能基塘系统: 塘生态智慧在三峡水库消落带生态恢复中的运用[J]. *景观设计学(英文)*, 2017, 5(1):8-21.
- [56] 陈义勇, 俞孔坚. 古代“海绵城市”思想——水适应性景观经验启示[J]. *中国水利*, 2015(17):19-22.
- [57] 小詹姆士·L·威斯科特, 刘妹. 古代水利基础设施比较研究对新兴城市的意义[J]. *景观设计学*, 2014(5): 56-68.
- [58] Keeley M, Koburger A, Dolowitz D P, et al. Perspectives on the use of green infrastructure for stormwater management in Cleveland and Milwaukee[J]. *Environmental Management*, 2013, 51(6):1093-1108.
- [59] Sharpley J, Eckhardt D, Montgomery J, et al. Rapid Assessment and Integration of Green Stormwater Infrastructure in CSO Reduction Plans[J]. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2009, 2009(18):272-280.
- [60] Mguni P, Herslund L, Jensen M B. Sustainable urban drainage systems: examining the potential for green infrastructure-based stormwater management for Sub-Saharan cities[J]. *Natural Hazards*, 2016, 82(2):241-257.
- [61] Nickel D, Schoenfelder W, Medearis D, et al. German experience in managing stormwater with green infrastructure[J]. *Journal of Environmental Planning & Management*, 2014, 57(3):403-423.
- [62] Wang R, Eckelman M J, Zimmerman J B. Consequential environmental and economic life cycle assessment of green and gray stormwater infrastructures for combined sewer systems[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(19):11189-11198.
- [63] 袁嘉, 袁兴中, 王晓锋, 等. 应对环境变化的多功能湿地设计——三峡库区汉丰湖芙蓉坝湖湾湿地生态系统建设[J]. *景观设计学*, 2018, 6(3):76-89.
- [64] 王如松, 马世骏. 边缘效应及其在经济生态学中的应用[J]. *生态学杂志*, 1985(2):38-42.

UNDERSTANDING THE ESSENCE OF ECOLOGICAL PLANNING AND DESIGN:A REVIEW OF HYDRO- ECOLOGICAL INFRASTRUCTURE

Jing Zhang, Guanyu Cao

【 Abstract 】 In the context of rapid urbanization and global climate change, issues related to water ecology, water security, and water environment have received sustained attention. As a basic spatial structure, Hydro-ecological Infrastructure plays an important role in maintaining the stability of ecosystem processes, providing ecosystem services to human beings, and ensuring the integrity of biological habitats. On the basis of clarifying the connotation of Ecological Infrastructure and Hydro-ecological Infrastructure, the background and definition of related concepts are compared, and the concept of using Hydro-ecological Infrastructure to collectively refer to related concepts is proposed. The main research directions of Hydro-ecological Infrastructure are reviewed, including Hydro-ecological Infrastructure planning, stormwater management, climate change addressing, performance evaluation, and traditional wisdom and experience. Through the prospect of future research on Hydro-ecological Infrastructure, the nature of ecological planning and design is analyzed and explained, and the planning and design strategy of “closed ecological process” is put forward.

【 Keywords 】 water ecology; ecological infrastructure; ecosystem services; planning and design