

DOI: 10.5846/stxb201905311146

俞孔坚.道法自然的增强设计:大面积快速水生态修复途径的探索.生态学报,2019,39(23):8733-8745.

Yu K J. Large scale ecological restoration: empowering the nature-based solutions inspired by ancient wisdom of farming. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39 (23): 8733-8745.

道法自然的增强设计:大面积快速水生态修复途径的探索

俞孔坚^{1,2,*}

1 北京大学建筑与景观设计学院, 北京 100871

2 北京土人城市规划设计股份有限公司, 北京 100083

摘要:农民利用千百年积累的生态智慧,通过简单而有效的方法,用最少的投入,实现大面积的改变,营造可持续的、源于自然而又高于自然的地球表面景观。文章探讨了如何重新发掘农民道法自然的生态智慧,进行大面积水生态修复的理念、方法和案例。基于作者及其团队 20 多年的研究和实践,提出了“传统生态智慧—模式提炼—增强设计—运行检测(POE)—模块技术—现代生态修复工程”的研究和实践路径,将传统农耕生态智慧进行了增强设计,形成了模块化的当代生态工程技术,用于大面积国土生态修复,尤其是以水为核心的生态过程与景观的生态修复,在全国 200 多个城市的山水林田湖草生态修复工程中进行实践并得到检验。

关键词:生态修复;基于自然的途径;道法自然;传统生态智慧;景观设计;设计生态学

Large scale ecological restoration: empowering the nature-based solutions inspired by ancient wisdom of farming

YU Kongjian^{1,2,*}

1 School of Architecture and Landscape Design, Peking University, Beijing 100871, China

2 Beijing Turen City Planning and Design Co., Ltd., Beijing 100083, China

Abstract: For centuries' experiences, the Chinese peasants have accumulated a significant amount of ecological wisdom in transforming the surface of the earth and turning it into sustainable landscape, which was both productive and ecologically healthy. These ecological design methods were generally nature-based and inexpensive. This article discussed about the rediscovery of nature-based solutions inspired by the Chinese ancient wisdom of farming and their application in transforming the ecological landscape at a large scale. Accordingly inspired by the ancient ecological wisdom, and based on years of research, experiments and practices, the author was experienced and competent to develop a series of modules of strengthened nature-based solutions, including practical approaches such as ancient ecological wisdom, modules extract, strengthened design, performance testing (POE), model technology and ecological restoration engineering, and implement them at large scale in over 200 cities across China and beyond.

Key Words: ecological restoration; nature-based solutions; design with nature; ancient ecological wisdom; landscape architecture; designed ecologies

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0401108);国家自然科学基金面上项目(51678002)

收稿日期:2019-05-31; 修订日期:2019-09-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: kjyu@urban.pku.edu.cn

1 传统农耕智慧对大面积水生态修复的启示

中国广大城乡面临着各种严峻的生态退化问题,尤其是以水为核心的生态退化和生态灾害:洪水和城市内涝、干旱、地下水位下降、水体的大面积污染及生物栖息地的大面积消失和退化,等等^[1]。如何用简单的方法和最少的投入来大面积解决这些问题,是当今中国生态文明和美丽中国建设事业所面临的一项巨大挑战。一方面,中国虽然在水问题的科研投入很大,但却由于“科研-实践”错位的存在(过度学术化与目标单一化)使得诸多研究无法和生态实践接轨,同时片面地利用目标单一的科研成果无法系统解决中国的生态问题^[2],例如修建防洪墙以保护城市免受洪涝灾害,在地下铺设管道和蓄水池以排放和滞蓄雨水,修建更高标准的污水处理厂来清洁水中的富营养来使河湖变清等。我们习惯于通过大规模的灰色基础设施建设,来试图改善和治理生态与环境问题。这些灰色基础设施工程大多目标单一,只注重解决局地的资源短缺和生态与环境问题,不仅昂贵,而且通常是不可持续的,往往在解决局地问题的同时,对系统性的和全局性的生态与环境带来副作用^[3]。

而另一方面,自然本身具有自我修复和调节能力,如湿地的自我净化、植被的自我修复、群落的自我重建,等等。如何基于自然进行设计是全世界学界关注的议题,且已探索出多种不同的模式^[4],中国在这方面又有其自身的独特性和悠久的传统。中国各地由于自然条件不同,数以千年的农耕经验衍生了丰富的、与当地的自然地理和气候及生物条件相适应的生态智慧,如哈尼族人通过营造梯田,在山坡上种植水稻;珠江三角洲和长江三角洲地区的先民,在不适宜人居和农业生产的沼泽和滩涂上,通过简单的填挖方,营造了生境极其丰富的、丰产而美丽的桑基鱼塘生态系统,彻底改变了自然沼泽景观;旱涝交替的丘陵山区,先民们通过低矮的堰坝,营造陂塘系统,调节水旱,维持千百年持续不衰的农耕生态系统^[5-12]。诸如此类的基于自然的、道法自然的生态工程智慧,往往简单且成本低廉,能跨尺度大规模地改变地球表面景观,如广袤山地上的梯田、三角洲地区的桑基鱼塘,为大规模的国土生态修复行动,提供了启迪和智慧源泉^[13]。

但是,基于自然的传统生态智慧,在改造和修复生态系统的过程中,往往见效慢、时间成本高、标准化程度低,不能适应现代工程实践。为此,笔者在此提出另一种系统解决大面积水生态环境问题的方法:道法自然的增强设计,也就是从农耕技术特别是基于水的农耕生态智慧和工程技术中寻找灵感,形成标准化的技术模块,进行规模化地推广实施,实现大面积的水生态修复。这种道法自然的增强设计正是农业文明与工业文明的结合与升级,是使生态文明理念落地的有效的生态工程技术途径^[14-15]。

2 道法自然的模式景观和增强设计

传统农耕生态智慧非常丰富,本文只讨论3种颇具中国特色的生态智慧:梯田、陂塘和基塘,它们所包含的生态意义已经得到许多学者的重视^[16-32]。这3种造田和理水技术实际上都是景观改变技术,具有以下几大特点:其一,它们实际上都是生境营造技术,通过生境的改善来满足生物生产,使生境系统的生产力基于自然却高于自然,并提供满足人类需要的综合生态系统服务,因而它实质上也是生态修复技术;其二,它们都是通过简单的地形改造来调节生态水因子的技术,而水因子是生态系统的主导和关键因子,通过水因子的质和量的调节,可以有效调节生境系统,因此,这些都是事半功倍的生态修复途径;第三,它们都是就地土方平衡技术,即挖-即填(Cut-and-fill),没有土方的远距离搬运,对土地的破坏小,操作简单,可以进行跨尺度操作和大面积工程化,因此,它们都是投资低廉的技术。这三种农业景观技术都是千百年来中国先民对季风性气候的适应智慧,具有本土特征,对当代中国大面积水生态退化问题的改善,具有巨大的应用价值^[33-34]。

但是,这些源于农业生产、基于自然的生境营造技术,在调节生态过程和生物生产过程中,相对于工业化、机械化、化肥农业工程及现代水利工程来说,往往效率低、量化程度低、标准化程度差、可复制性差,尤其对当代面临的山水林田湖草生命共同体的过程与功能调节的影响,如对生物多样性、水质净化、土壤改良等,尚有些不确定性,需要有进一步的研究^[35]。正如青蒿素的科学提取、试验和广泛应用,生态修复工程的传统农业

智慧也需要经过科学萃取、量化检测和标准化,才能得到大面积地推广和应用。为此,提出了传统生态智慧工程化的研究和实践总体框架和路线:传统生态智慧—模式提炼—增强设计—运行检测 (POE: Post Occupancy Evaluation, 使用后评价)—模块技术—现代修复工程(图 1)。

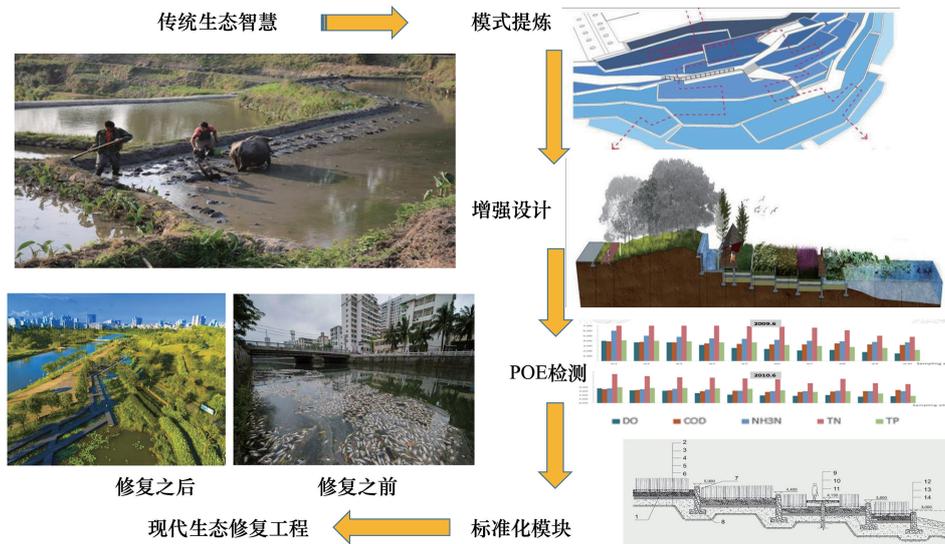


图 1 传统生态智慧工程化流程图

Fig.1 Flowchart of reviving ancient ecological wisdom for modern ecological engineering

POE: Post Occupancy Evaluation, 使用后评价; DO: 溶解氧; COD: 化学需氧量; NH₃-N: 氨氮; TN: 总氮; TP: 总磷

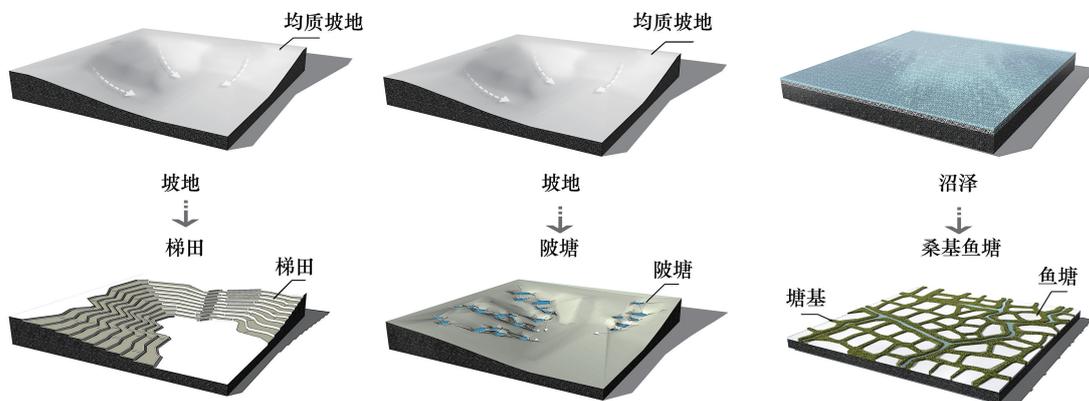


图 2 三个充满生态智慧的景观技术模块:梯田、陂塘和基塘

Fig.2 Three landscape architecture modules inspired by the ancient ecological wisdoms: terrace, impounding pond, dike-pond

基于上述传统生态智慧工程化的思路,对梯田、陂塘和基塘等 3 种中国传统生态工程智慧(景观改变模式)进行了模式萃取和试验增强设计(图 2),并进行了大量试验工程的观察,形成生态工程模式(表 1)。需要指出的是,这里所说的生态修复设计的目标不是单一生态功能指标,而是健全和提高综合生态系统服务^[36-37](ecosystem services),也即生态系统服务导向的生态修复设计^[38-39](Ecosystem Services-Oriented Regenerative Design)。

3 运用道法自然的增强设计进行生态修复

上述道法自然的 3 个生态工程技术或景观改变模块,可以集合运用并与其它生态修复技术相结合,进行

大规模的生态修复工程。以下案例重点说明每一生态工程技术模块的应用实践。

表 1 传统农耕生态智慧的 3 个景观改变模式及其应用于生态修复的增强设计思路

Table 1 Three landscape architecture modules and its enhancing design ideas applied in ecological restoration

传统生态智慧的景观改变模式 Landscape change pattern of the ancient ecological wisdom	梯田 Terrace	陂塘 Impounding pond	基塘 Dike-pond
特征与基本模式 Features and basic patterns	在缺水的、均质的山坡上,通过就地填挖方,形成可耕作的平面	利用低洼之地汇集周边水源而形成的池塘或沿溪流筑堰而形成的汇水区	在均质的三角洲沼泽湿地上,通过就地填挖土方,形成水陆交替、多样化的生境
原始功能 The original function	水土保持,利于灌溉施肥和人畜耕作,种植水稻等多种作物,使不适宜耕作的山坡地变成丰产而可持续的文化景观	滞蓄雨水或溪水,调节旱涝,用于灌溉或生活	塘里养鱼,基上植桑和作物,丰富的水陆生境,使本来不适宜农作和养殖的生境,转变为丰产的生境
对生态修复的意义 Significance for ecological restoration	水土保持,改良土壤,营造生境,截留面源污染(富营养),利用生物吸收净化水土污染物,开启和强化自然修复过程	调节地表水文过程,削减径流峰值,调节旱涝,截留和净化面源污染,营造异质栖息地斑块	通过地形改造,改变水因子和养分的分布,从而滞蓄雨洪、削减地表径流、将单一的生境转变为多样化的栖息地,促进生物多样性繁衍,促进水土的生物净化过程
增强设计 Enhanced design	通过多级梯田联动、潜流和表流结合来增强水土和生物的联系,通过不同水深和介质设计,形成和优化多样化的生物群落,增强对矿物和营养物质的吸收能力,促进生物净化过程,修复整体生态系统	通过陂塘的串联,设计堰坝的过滤和曝氧功能,增强陂塘的调节和净化功能;通过陂塘三维尺度的设计,创造多样化的生境系统	通过三维地形参数的多样性设计,包括塘和基底标高变化,丰富景观的多样性,从而强化生境的多样性,增强和加速生态重建、修复过程

3.1 加强型梯田湿地水净化及生态修复案例

3.1.1 上海后滩公园

场地原状:实验场地 13 hm²,场地原为工业棕地,工业固体垃圾和建筑垃圾遍地,且埋藏很深。水土污染严重,黄浦江水为劣 V 类水(地表水环境质量标准(GB3838—2002));江水与防洪堤的高差达 3.4—5.5 m 之间,有高差达 2.1 m 的潮间带。场地原有废弃地上被外来物种(一枝黄花)入侵,呈现出一派荒芜的景象。在满足防洪要求的同时,如何修复生境,营造安全、健康、亲水的滨江公共空间等,都是设计面临的挑战(图 3)。

生态修复设计:作为上海 2010 年世博会的一个展示工程,以改善综合生态系统服务为目标,该项目的核心设计之一是利用黄浦江岸的高差,设计了潜流湿地和表流湿地相结合的加强型梯级湿地系统,并与一系列低堰过滤系统相结合,大量配置水生植物,形成了一条长达 1.7 km 的人工湿地水净化系统带(图 4),在水质净化的同时也给梯田进行了施肥,营造了生机勃勃的生态景观(图 6)。

生态修复效果:经过多年的运行检测证明,后滩公园的水净化能力是每天每公顷 800 t,它将黄浦江劣 V 类水(地表水环境质量标准(GB 3838—2002)),在缓慢流动过程中,经过沉淀、重力曝气加氧、土壤和植物及微生物的吸收和分解作用,净化至 III 类水(地表水环境质量标准(GB 3838—2002))(图 5),并成为城市中多种生物的栖息地。它既是一个具有实际功能的水净化系统和可以大面积推广的滨水带生态修复示范,也是一个科普教育基地和深受市民喜爱的休憩地(图 6)^[40-42]。



图 3 上海后滩场地原状

Fig.3 Pre-existing conditions of Houtan park, Shanghai

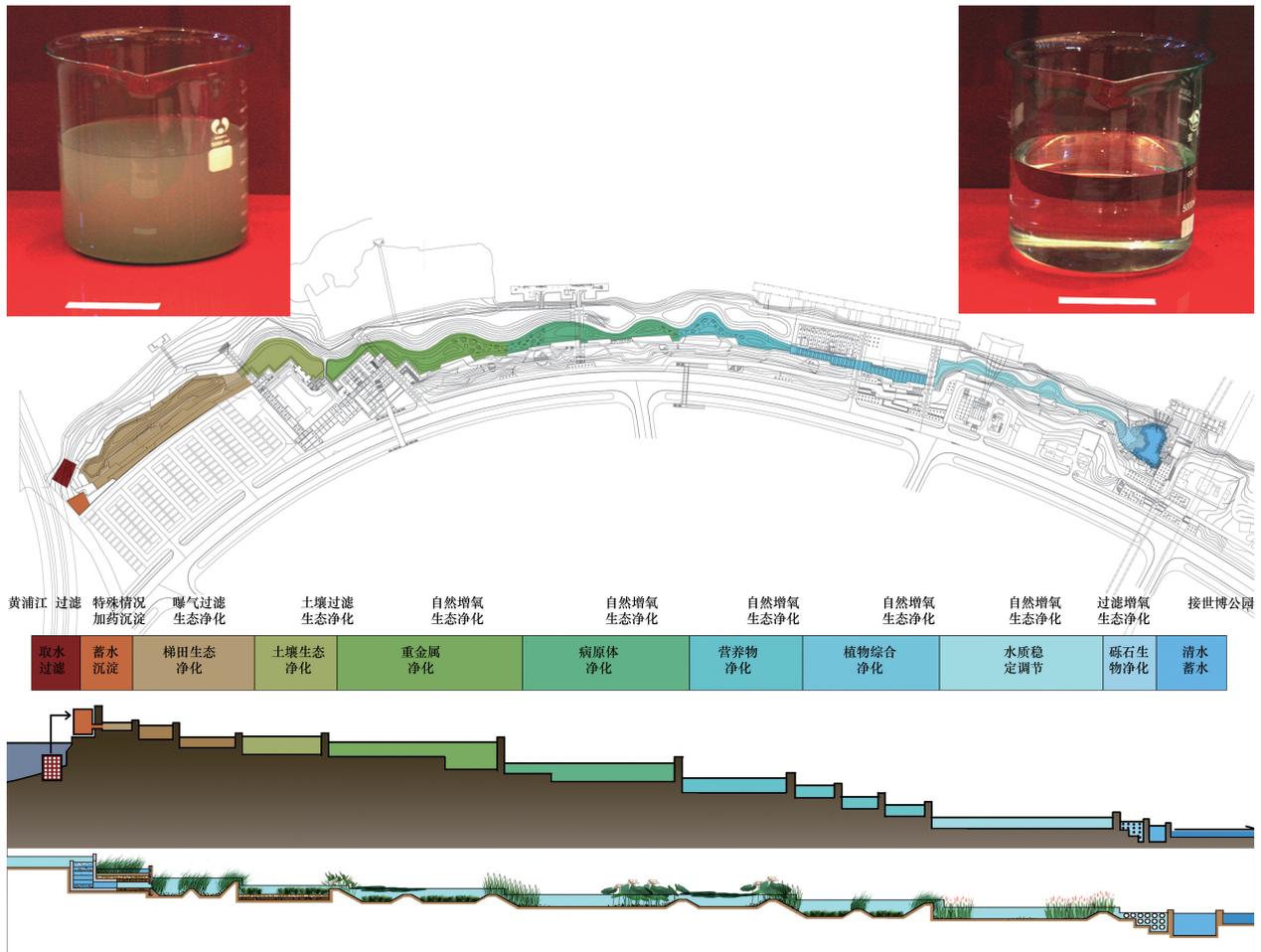


图 4 上海后滩加强型人工湿地水净化流程示意图

Fig.4 Water purification diagram of the reinforced constructed wetland in Houtan park, Shanghai

3.1.2 海口美舍河水生态修复

场地原状:海口美舍河全长 23 km,它贯穿了整个城市的建成区,几十年来却成为这个城市的噩梦—城市污水的集中排放地、河渠硬化、生境消失(图 7)。多年来,虽已陆续开展了一系列修复工作,比如建立堤坝和水闸来控制洪水和海洋潮汐、河床清淤、岸边种植园林花卉、阻断污染的支流汇入等。但所有这些目标单一、功能分割的治理措施却导致环境和生态更加恶化,水体黑臭、死鱼浮于水面、陡直的水泥防洪堤坝等画面经过央视新闻的报道而全国皆知。

生态修复设计:该生态修复项目将河流廊道设计为综合的生态基础设施,系统解决城市内涝、生态退化和水环境问题,修复河流廊道,营造景色优美的休憩场所。其核心的设计策略为去除水泥河岸,在过去水泥防洪堤和垃圾遍布的河岸上,就地土方平衡,构建多重组合式梯级人工潜流湿地(图 8)。这些梯级湿地被设计为水净化设施,主要净化两种水源:携带大量营养物质的非点源污染地表径流和附近还未接入污水处理系统的城中村排放的生活污水。这两种水源可交替进行或者根据需要进行切换。污水灌溉的湿地产生的生物量可进行收割作为生物质能源和有机肥的原料。

生态修复效果:短短一年时间,美舍河的水生态修复便取得了显著的效益。梯级湿地每天可处理 6000 t 的城市地表径流,使水质由劣 V 类水提升至 III 类水(地表水环境质量标准(GB 3838—2002)),可达到景观娱乐用水(游泳等)水质标准。梯级湿地也可每天净化 3500 t 生活污水并同样可将水质提升至 III 类水(地表水环境质量标准(GB3838—2002)),其中对 NH₃-N、TP、COD 等指标具有显著的削减效果,平均削减率均达

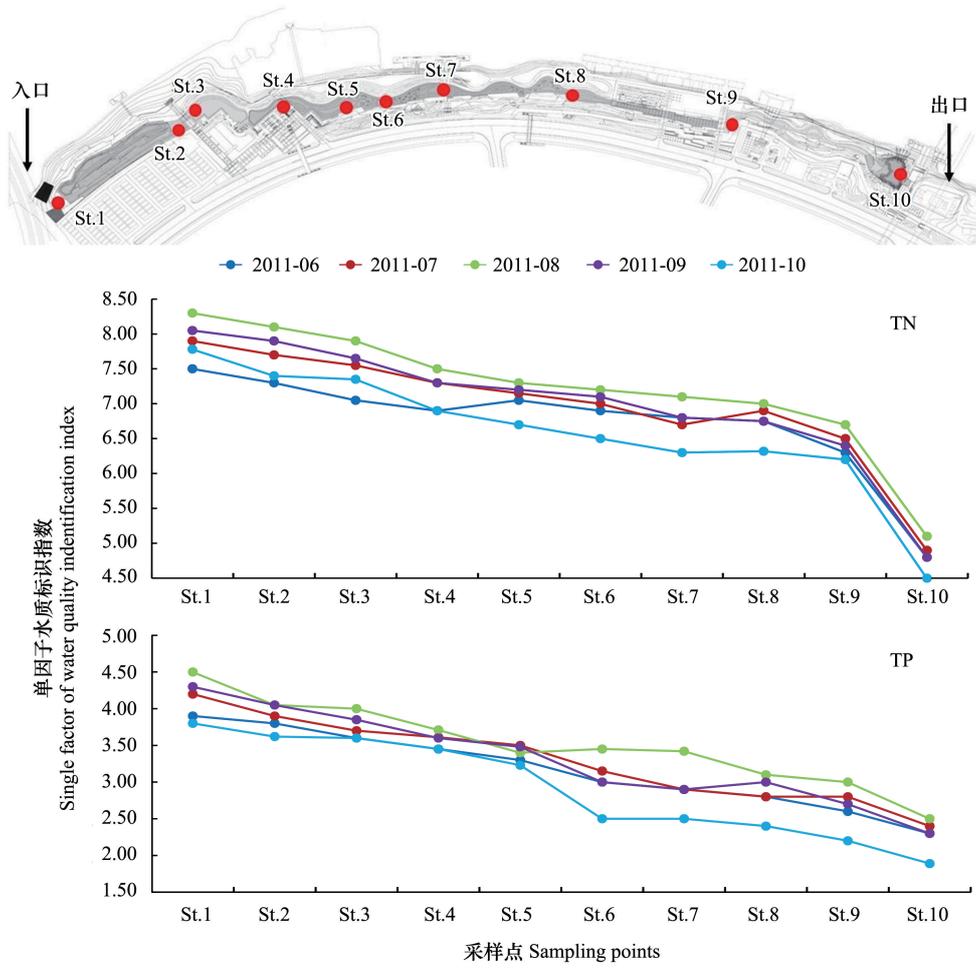


图5 使用后实际检测的水净化效果

Fig.5 The water purification effect in POE test

St.1: 采样点 1; St.2: 采样点 2; St.3: 采样点 3; St.4: 采样点 4; St.5: 采样点 5; St.6: 采样点 6; St.7: 采样点 7; St.8: 采样点 8; St.9: 采样点 9



图6 修复后的后滩公园: 生机勃勃的生境, 同时是一个水净化系统

Fig.6 Houtan park after restoration: A vibrant habitat and a water purification system

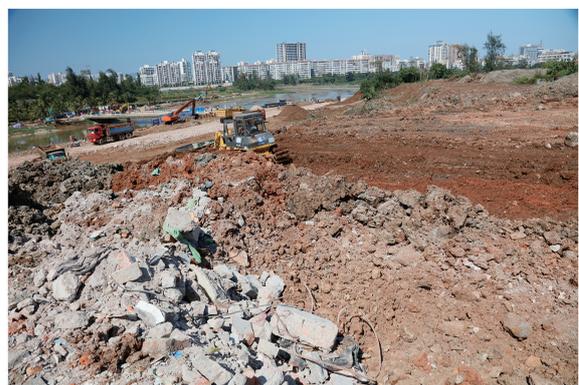


图7 美舍河原状

Fig.7 The pre-existing conditions of the Meishe River

50%以上(图9)。河水变干净了,鱼儿和鸟类回来了,红树林在城市中心的水系两岸得以恢复,成千上万的游客被吸引来参观(图10)。由于这一项目的成功,2018年海口被列为拉姆萨公约缔约国组织第18个国际湿地城市。但最为重要的是,本项目所采用的基于自然解决途径的设计是可以复制的^[43]。

3.2 陂塘的增强设计与水生态系统修复案例

3.2.1 六盘水明湖湿地生态修复

现状问题:六盘水是一个有60万人口的工业城市,面临严重的环境和生态问题,包括河道硬化、湿地毒化、水土污染严重、生物栖息地丧失等,同时,由于地处石灰岩地质环境,城市内涝频发,市民的休憩空间缺乏(图11)。

生态修复设计:该项目的总体设计策略是创建一个生态基础设施,将现有水系、湿地和所有可用土地进行系统规划,构建连续的生态基础设施,承担雨洪管理和生态净化功能。设计手法主要采用了串联陂塘的方式,增加了水陆交界面的表面积,截留和净化了地表雨水径流,调节旱涝,开启了多样化的生物群落演替进程,营造了一系列生物栖息地,同时与游憩路网和场所相结合。

生态修复效果:经过修复的明湖湿地,不仅可以显著降低雨洪流速,还具有明显的水质净化效果,对COD、SS、TN、TP等污染物的去除率达40%以上(图12),同时在栖息地修复、生物多样性的提高等诸方面的成效也非常显著,目前已经成为国家级湿地公园,为居民提供了良好的游憩空间,综合生态系统服务优良^[44](图13)。

3.2.2 广州天河智慧城大观湿地

场地原状:项目位于广州市天河智慧城,占地面积约46.8 hm²。原为一条地表排水沟渠,坡度较大,水土流失严重,植被稀疏,面源污染严重,对下游水库的水质和水量安全都有严重影响。

生态修复设计:设计结合地形,沿谷地修建了一系列低堰,形成了串联式陂塘体系,沿陂塘四周配置各种水生植物,在季节性淹没区,配置了大量水杉和池杉等。同时,结合生态修复技术,构建了游憩网络,为科技人员提供了休憩场所(图14)。

生态修复效果:天河智慧城大观湿地建成后迅速修复了冲沟的生境,并发挥了雨洪调蓄、水质净化、生物栖息地保育以及满足居民休憩需求等综合的生态系统服务功能^[45](图15),成为广州市首个海绵城市范例并被推广。

3.3 基塘增强设计进行海绵城市建设与棕地修复案例

3.3.1 哈尔滨群力雨洪公园

场地原状:场地面积34.2 hm²,原为一块省级原生湿地。受周边道路建设和高密度城市发展的影响,水源枯竭,湿地面临退化甚至消失的困境(图16)。



图8 美舍河生态修复的水过程设计图

Fig. 8 Water process design of the ecological restoration in Meishe River

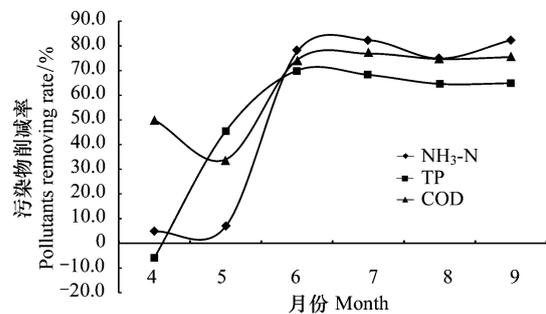


图9 美舍河梯田湿地净化效果监测^[43]

Fig. 9 Water purification test of the terrace wetland in Meishe River^[43]



图 10 生态修复后的美舍河既具有生机勃勃的生境,同时也是一个水净化系统

Fig.10 The restored Meishe River: a vibrant habitat and a water purification system



图 11 六盘水明湖湿地原状:城市棕地

Fig.11 The original conditions of Minghu wetland in Liupanshui

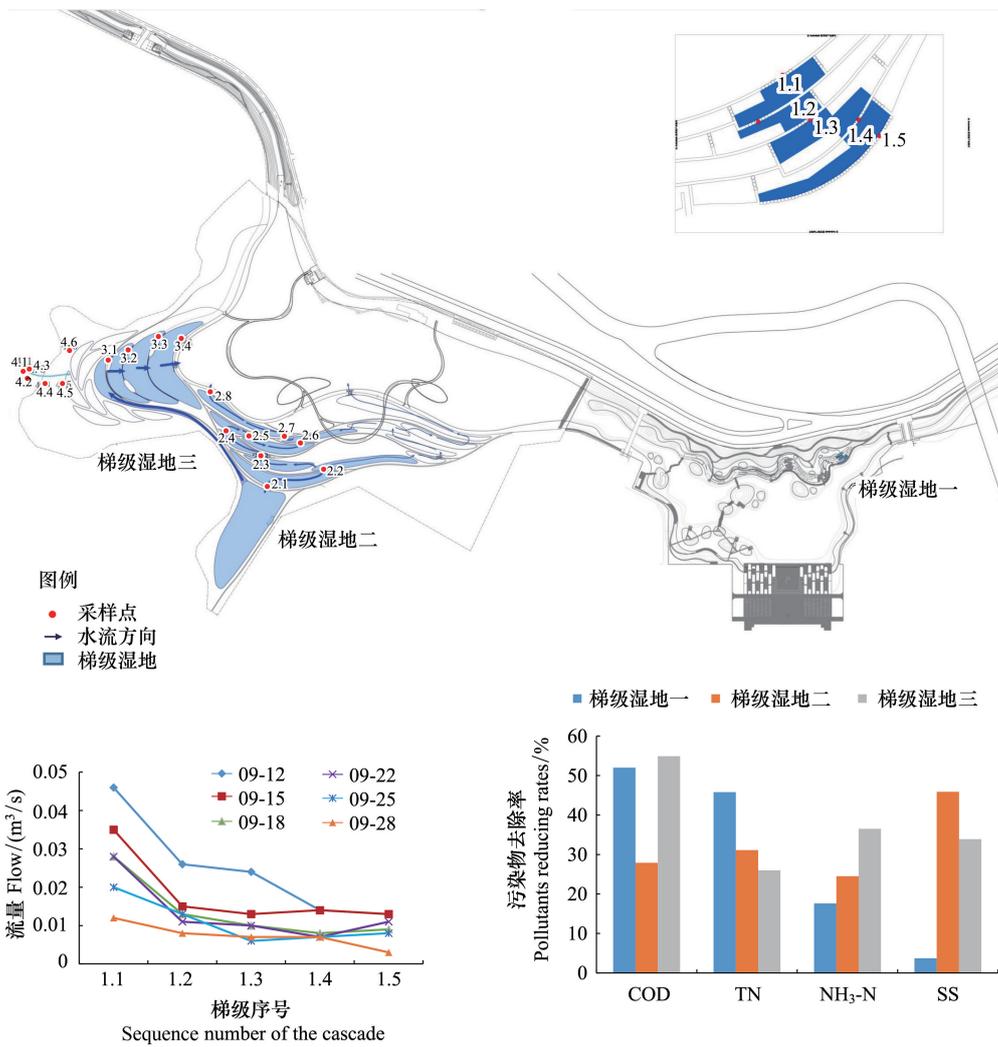


图 12 湿地修复效果监测

Fig.12 Effect monitoring of the wetland restoration

SS: 固体悬浮物



图 13 生态修复后的六盘水明湖湿地

Fig. 13 Landscape of Minghu wetland in liupanshui after ecological restoration



图 14 广州天河智慧城冲沟生态修复建成效果航拍

Fig.14 Aerial photo of the gully ecological restoration of Tianhe intelligent city in Guangzhou



图 15 广州天河智慧城冲沟生态修复后局部景观

Fig.15 The local landscape of the gully ecological restoration of Tianhe intelligent city in Guangzhou



图 16 哈尔滨群力湿地公园场地原状:退化的湿地

Fig.16 The pre-existing conditions of Qunli wetland park: a degraded wetland

生态修复设计:从提高综合生态系统服务出发,利用城市雨洪资源,项目设计将湿地转化为城市绿色海绵,在修复湿地的同时,收集、净化和储存雨水,并补充地下水含水层,使生境得以修复。设计的主要策略是沿场地四周通过挖填方的平衡技术,仅用一台挖掘机来营造串联式基塘作为雨水过滤和净化带,成为一条蓝绿交织的生态项链,同时保留湿地中部的大部分区域,作为自然演替区。沿湿地四周布置雨水进水管,收集新城市区的雨水,使其经过沉淀和过滤后进入核心区的自然湿地。不同深度的水泡为乡土水生和湿生植物群落提供多样的栖息地,开启自然演替进程^[46-49]。

生态修复效果:原来被城市包围的退化的省级湿地保护区,目前已经晋升为国家级城市湿地公园(图 17)。在有效解决城市内涝的同时,修复和改善了湿地系统,乡土生物多样性得以保存并逐年有所提高,同时为城市居民营造了舒适的居住环境^[50](图 18)。

3.3.2 天津桥园城市棕地生态修复

场地原状:桥园位于天津市河东区,原为一处打靶场,地势低洼,垃圾遍地,污水横流,盐碱化非常严重(图 19)。

生态修复设计:项目运用基塘策略,通过地形设计,在平坦单一的城市棕地上,形成深浅不一的 21 个洼地,将场地雨水全部收集进入洼地。每个洼地都有不同的标高,海拔高差变化以 10 cm 为单位,有深有浅。深水泡的水深达 1.5 m,直接与地下水相连,也有浅水泡和季节性的水泡(图 20),创造出具有不同的水分和盐碱度的生境条件,适宜于不同植物群落的生长和繁衍。在营造地形的过程中,对场地的生活垃圾进行就地利用处理。植被群落的形成从种子开始,设计师根据地域景观的调查、取样,将植物种子配制混合后,在每个低洼



图 17 生态修复后的哈尔滨群力湿地公园

Fig.17 The Qunli wetland park after ecological restoration

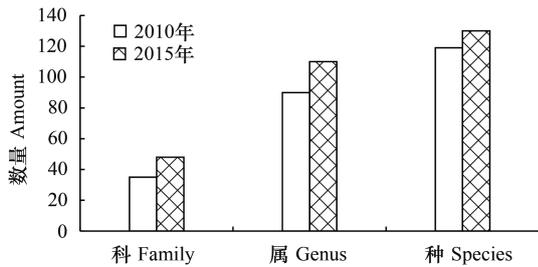


图 18 哈尔滨群力湿地公园修复效果监测：2010 年和 2015 年野生植物科、属、种变化^[50]

Fig.18 Monitoring of restoration effect of Qunli wetland park in Harbin; changes of family, genus and species of wild plants in 2010 and 2015^[50]



图 19 天津桥园场地原状：城市棕地

Fig.19 The pre-existing conditions of Qiaoyuan park in Tianjin

地和水泡四周播撒,根据生态适应原理,形成适应性植物群落。这些群落是动态的,一方面,由于初始生境不能满足某些植物的生长,所以一些播种的植物在生长过程中逐渐被淘汰;另一方面,一些没有人工播种的乡土植物,通过各种传媒不断进入多样化的生境,而成为群落的有机组成部分^[38-39]。

生态修复效果:昔日的一块脏乱差的城市废弃地,经过道法自然的增强设计,在很短时间内被修复成为具有雨洪滞蓄、乡土生物多样性保护、环境教育、审美启智和游憩等生态服务的、多功能的城市生态型公园,生物多样性逐年提高。并且,该方法简单易行,成本低廉,可大面积复制^[50-52](图 21—22)。

4 结语

大面积的国土生态退化和环境恶化,威胁民族生存和国家的可持续发展,生态修复工作迫在眉睫,已经成为国



图 20 天津桥园公园总平面图

Fig.20 Site plan of Qiaoyuan park



图 21 生态修复后的天津桥园

Fig.21 The Qiaoyuan park after ecological restoration

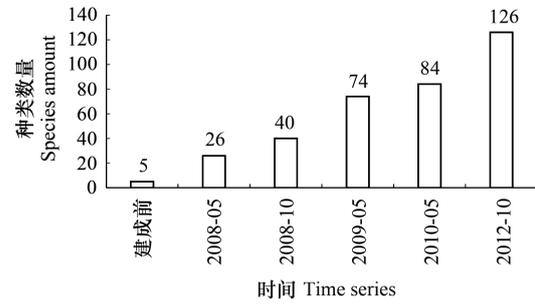


图 22 天津桥园棕地修复效果监测:生物多样性的变化(2008—2012)^[43]

Fig.22 Biodiversity improvement after ecological restoration of the brown field (2008—2012)^[43]

家生态文明建设的核心战略。作为一个系统的、大面积的国家工程,生态修复必须坚持保护优先、自然修复为主的方针^[53]。但是,完全的自然修复过程漫长,时间成本很高。所以,如何通过增强设计,加速基于自然的生态修复过程,尤其是以水为核心的生态修复过程,是一个重大的科学问题,也是一个非常实际的工程问题,具有重要的理论和实践意义。农耕文明本质上是基于自然、道法自然的初级生态文明。基于成功与失败的生存考验,先民们为适应多样化的自然条件进行生产和生活,发展出丰富的生态智慧和工程技术,对破解当代社会由于工业文明的泛滥而带来的生态与环境问题,提供了启迪和借鉴。这些基于自然的传统生态智慧的最大优点是成本低廉、技术简单。如同青蒿素的科学提取和应用,使基于采猎文明和农业文明的中医药智慧成为有效的医治疾病的当代医药,通过对传统生态智慧的萃取和标准化,形成当代工程技术模块,可以有效地进行大面积的水生态修复。在此理念指导下,过去 20 多年来,北京大学及土人设计在全国 200 多个城市完成了 500 多个水生态修复工程案例(图 23),形成了一些适宜于大面积推广复制的景观改变模块,并对其中部分案



图 23 应用传统生态智慧进行增强设计的生态修复案例分布

Fig.23 Distribution of ecological restoration projects through strengthened nature based, design in China

例进行运行监测,积累了大量实际观察的数据,为更大面积的水生态修复推广提供了依据^[54-62]。需要指出的是,传统智慧的现代工程化,是一项艰巨的工作,本文的一些定量实验结果有待完善。

参考文献 (References):

- [1] 欧阳志云. 中国生态环境现状及趋势剖析. 张健, 阿梅莉亚·詹森, 译. 景观设计学, 2016, 4(5): 30-37.
- [2] 王志芳. 图示景观设计实践与现代科研的错位与解决途径. 田乐, 黄延峰, 译. 景观设计学, 2018, 6(5): 66-71.
- [3] 张饮江, 李凤莹, 吴文明. 城市水体生态修复与景观的协同营建. 张健, 阿梅莉亚·詹森, 译. 景观设计学, 2017, 5(1): 66-71.
- [4] 王志芳, 袁振宇. 设计生态的不同视角. 田乐, 译. 景观设计学, 2019, 7(1): 8-17.
- [5] 姚云峰, 王礼先. 我国梯田的形成与发展. 中国水土保持, 1991, (6): 54-56.
- [6] 陈金凤, 赵凌飞. 略论东晋南朝江南地区的陂塘建设. 华北水利水电学院学报: 社科版, 2013, 29(4): 19-22.
- [7] 韩西丽, 俞孔坚, 李迪华, 王思思. 基塘-城市景观安全格局构建研究——以佛山市顺德区马岗片区为例. 地域研究与开发, 2008, 27(5): 107-110, 128-128.
- [8] 裴丹. 太湖下游平原洪涝适应性景观演变及机理[D]. 北京: 北京大学, 2014.
- [9] 惠富平, 黄富成. 汉代江淮地区陂塘水利发展及其环境效益. 中国农史, 2007, 26(2): 3-8.
- [10] 刘文杰, 余德章. 四川汉代陂塘水田模型考述. 农业考古, 1983, (1): 132-135.
- [11] 张芳. 中国传统灌溉工程及技术的传承和发展. 中国农史, 2004, 23(1): 10-18.
- [12] 王龙, 王琳, 杨保华, 李靖. 哈尼梯田水文化及其保护初步研究. 中国农村水利水电, 2007, (8): 42-44.
- [13] 俞孔坚. 人类世生态系统与生态修复. 萨拉·雅各布斯, 译. 景观设计学, 2016, 4(1): 6-9.
- [14] Yu K J. Green Infrastructure through the Revival of Ancient Wisdom. The American Academy of Arts and Sciences Bulletin Summer, 2017, LXX(4): 35-39.
- [15] Yu K J. Creating deep forms in urban nature; the peasant's approach to urban design//Steiner F R, Thompson G F, Carbonell A, eds. Nature and Cities—The Ecological Imperative in Urban Design and Planning. Cambridge, Massachusetts: Lincoln Institute of Land Policy, 2016: 95-117.
- [16] 吴发启, 张玉斌, 宋娟丽, 余雕. 水平梯田环境效应的研究现状及其发展趋势. 水土保持学报, 2003, 17(5): 28-31.
- [17] 吴发启, 张玉斌, 王健. 黄土高原水平梯田的蓄水保土效益分析. 中国水土保持科学, 2004, 2(1): 34-37.
- [18] 冉大川, 赵力仪, 王宏, 刘斌, 白志刚, 马勇. 黄河中游地区梯田减洪减沙作用分析. 人民黄河, 2005, 27(1): 51-53.
- [19] 毛占坡. 农业非点源污染物在多水塘/源头溪流中的迁移动态和模型研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2003.
- [20] 涂安国, 尹炜, 陈德强, 叶闽, 雷阿林. 多水塘系统调控农业非点源污染研究综述. 人民长江, 2009, 40(21): 71-73.
- [21] 孙璞. 农村水塘对地块氮磷流失的截留作用研究. 水资源保护, 1998, (1): 1-4, 12-12.
- [22] Biggs J, Walker D, Whitfield M, Williams P. Pond action: promoting the conservation of ponds in Britain. Freshwater Forum, 1991, 1(2): 114-118.
- [23] Biggs J, Williams P, Whitfield M, Nicolet P, Weatherby A. 15 years of pond assessment in Britain: results and lessons learned from the work of pond conservation. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 2005, 15(6): 693-714.
- [24] Boothby J. Framing a strategy for pond landscape conservation: aims, objectives and issues. Landscape Research, 1999, 24(1): 67-83.
- [25] Fang W T. A Landscape Approach to Reserving Farm Ponds for Wintering Bird Refuges in Taoyuan, Taiwan [D]. Texas: Texas A&M University, 2003.
- [26] Froneman A, Mangnall M J, Little R M, Crowe T M. Waterbird assemblages and associated habitat characteristics of farm ponds in the western cape, South Africa. Biodiversity & Conservation, 2001, 10(2): 251-270.
- [27] Chou W W, Lee S H, Wu C F. Evaluation of the preservation value and location of farm ponds in Yunlin County, Taiwan. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2014, 11(1): 548-572.
- [28] Smith S V, Renwick W H, Bartley J D, Buddemeier R W. Distribution and significance of small, artificial water bodies across the United States Landscape. Science of the Total Environment, 2002, 299(1/3): 21-36.
- [29] Gao J, Wang R S, Huang J L. Ecological engineering for traditional Chinese agriculture—a case study of Beitang. Ecological Engineering, 2015, 76: 7-13.
- [30] Fairchild G W, Velinsky D J. Effects of small ponds on stream water chemistry. Lake and Reservoir Management, 2006, 22(4): 321-330.
- [31] Usio N, Imada M, Nakagawa M, Akasaka M, Takamura N. Effects of pond draining on biodiversity and water quality of farm ponds. Conservation Biology, 2013, 27(6): 1429-1438.
- [32] 姜芊孜, 俞孔坚, 王志芳. 基于 SWMM 的陂塘系统雨洪调蓄能力及应用研究. 中国给水排水, 2018, 34(11): 132-138.
- [33] 俞孔坚, 李迪华, 袁弘, 傅微, 乔青, 王思思. “海绵城市”理论与实践. 城市规划, 2015, 39(6): 26-36.

- [34] 俞孔坚. 论生态治水:“海绵城市”与“海绵国土”. 学术前沿, 2016, 11: 6-18.
- [35] 李迪华. 碎片化是生物多样性保护的最大障碍. 王颖, 艾美莉亚·詹森, 译. 景观设计学, 2016, 4(3): 36-41.
- [36] 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.
- [37] 李双成. 生态系统服务研究思辨. 萨拉·雅各布斯, 史肖杰, 译. 景观设计学, 2019, 7(1): 82-87.
- [38] Yu K J. Qiaoyuan Park, an ecosystem services-oriented regenerative design. *Topos*, 2010, 70: 28-35.
- [39] 俞孔坚, 石春, 林里. 生态系统服务导向的城市废弃地修复设计——以天津桥园为例. *现代城市研究*, 2009, (7): 18-22.
- [40] 俞孔坚. 城市景观作为生命系统——2010年上海世博会后滩公园. *建筑学报*, 2010, (7): 30-35.
- [41] Goldhagen S W. All work: Shanghai's Houtan park could be more eager to please. *Landscape Architecture Magazine*, 2013, 103(2): 70-79.
- [42] 董悦, 张饮江, 王聪, 金晶, 杜佳沐, 谢文博, 何培民. 2种水质评价方法对上海世博会后滩生态水系水质的评价效果. *江苏农业科学*, 2013, 41(1): 348-351.
- [43] 常贺星. 梯级潜流湿地的设计参数及其对水质净化效果的影响——以海口市凤翔公园为例[D]. 北京: 北京大学, 2018.
- [44] 陈曦. 城市梯级湿地景观作为多功能雨洪调蓄设施的运行绩效评价——以六盘水明湖湿地公园为例[D]. 北京: 北京大学, 2015.
- [45] 徐诗文. 设计参数及降雨条件对坑塘水质净化效果的影响[D]. 北京: 北京大学, 2018.
- [46] 俞孔坚. 建筑与水涝共生——哈尔滨群力雨洪公园. *建筑学报*, 2012, (10): 62-69.
- [47] 俞孔坚. 城市绿色海绵——哈尔滨群力国家城市湿地. *景观设计学*, 2011, 6(20): 88-95.
- [48] Yu K J. Stormwater Park for a water resilient city: Qunli national urban wetland. *Topos*, 2011, (77): 72-77.
- [49] Trulove J G. Look. Don't touch: at Qunli Stormwater Park, the draw of the impenetrable. *Landscape Architecture Magazine*, 2013, 103(2): 88-97.
- [50] 刘洁. 三个城市湿地公园的设计生态学实证研究[D]. 北京: 北京大学, 2017.
- [51] 林里. 基于生态系统服务的城市公园使用状况评价——以天津桥园为例[D]. 北京: 北京大学, 2011.
- [52] 黄超, 许涛, 刘莉莉. 生态系统服务导向的城市公园评价——以桥园公园为例. *成都大学学报: 自然科学版*, 2013, 32(2): 197-201.
- [53] 俞孔坚. 生态安全格局与国土空间开发格局优化. 萨拉·雅各布斯, 张健, 译. *景观设计学*, 2016, 4(5): 6-9.
- [54] 俞孔坚. 设计生态系统绩效研究导读. *生态学报*, 2019, (16): 5909-5910.
- [55] 王春连, 王佳, 郝明池. 不同设计参数对雨水湿地水量水质调控规律分析. *生态学报*, 2019, (16): 5943-5954.
- [56] 郦宇琦, 王春连. 基于燕尾洲生态护堤模式的金华江流域防洪效应研究. *生态学报*, 2019, (16): 5955-5966.
- [57] 郝晟, 王春连, 林浩文. 城市湿地公园生物多样性设计与评估——以六盘水明湖国家湿地公园为例. *生态学报*, 2019, (16): 5967-5977.
- [58] 吴宜洁, 林浩文, 王志勇. 宜昌运河公园多塘型城市绿地的水质水量调控效果及运行经验. *生态学报*, 2019, (16): 5978-5987.
- [59] 邓晔也, 王春连. 城市湿地公园使用者评价影响因素与行为偏好研究——以宜昌运河公园为例. *生态学报*, 2019, (16): 5988-6000.
- [60] 王立帅, 徐诗文, 林浩文, 吴珊珊. 城市湿地公园建成后综合绩效评估——以广州大观湿地为例. *生态学报*, 2019, (16): 6001-6016.
- [61] 王志勇, 马静薇, 王立帅, 李琳, 吴珊珊. 校园再生水回用人工湿地景观绩效评价及优化设计建议——以辽宁公安司法管理干部学院为例. *生态学报*, 2019, (16): 6017-6028.
- [62] 杨雪, 王志勇. 迁安三里河滨水缓冲带的雨水径流及污染物消减效果与设计优化建议. *生态学报*, 2019, (16): 6029-6039.