

李春华, 叶春, 刘福兴, 等. 近自然湿地生态修复的概念、理论与实践[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(1): 394-402.

LI C H, YE C, LIU F X, et al. Concept, theory and practice of near-natural wetland ecological restoration[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(1): 394-402.

近自然湿地生态修复的概念、理论与实践

李春华^{1,2}, 叶春^{1,2*}, 刘福兴³, 魏伟伟^{1,2}, 郑焱^{1,2}

1. 湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室, 国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 中国环境科学研究院
2. 环境基准与风险评估国家重点实验室, 中国环境科学研究院
3. 上海市农业科学院, 上海低碳农业工程技术研究中心

摘要 随着对湿地重要性认知的提高, 我国对湿地生态修复技术的需求也日益增加, 其中近自然湿地生态修复备受关注。描述了近自然概念的由来, 提出了近自然湿地的定义并辨析了其与人工湿地的主要区别。以太湖竺山湖湿地生态修复为例, 介绍了近自然湿地生态修复的设计思路、主要技术措施和修复效果。在竺山湖近自然湿地生态修复中, 依次实施了水文水动力改善、基底形态营造、植物恢复、水生动物恢复、生物量管理等措施, 具体包括: 改善水体连通性和流动性, 提高生境多样性和适宜性; 基于5种基底形态对污染物去除效果的分析, 构建了多起伏型基底形态; 根据土著适生、净化水质、兼顾景观等原则, 筛选出21属35种土著湿地植物, 设计并应用了2种植物配置模式; 根据生态系统调控(EwE)模型对湿地食物网结构的分析结果, 对水生植物收割量、鱼类及虾蟹类的种群数量提出了调控建议。生态修复后竺山湖水质由劣V类改善为II类(GB 3838—2002《地表水环境质量标准》), 大型水生植物多样性显著提高。竺山湖湿地生态修复效果验证了近自然生态修复方法的有效性, 今后还需不断在实践应用过程中丰富近自然湿地生态修复的理论及技术, 并开展大规模的实践应用。

关键词 近自然湿地法; 生态修复; 基底形态; 竺山湖湿地; 太湖

中图分类号: X524 文章编号: 1674-991X(2023)01-0394-09 doi: 10.12153/j.issn.1674-991X.20210832

Concept, theory and practice of near-natural wetland ecological restoration

LI Chunhua^{1,2}, YE Chun^{1,2*}, LIU Fuxing³, WEI Weiwei^{1,2}, ZHENG Ye^{1,2}

1. National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, Chinese Research Academy of Environmental Sciences
2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences
3. Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai Engineering Research Centre of Low-Carbon Agriculture

Abstract With the increasing recognition of the importance of wetlands, the demand for wetland ecological restoration techniques is increasing in China, among which near-natural wetland restoration method has attracted more and more attention. The history of the development of near-natural method was reviewed. The definition of near-natural wetland was put forward, and the main differences between near-natural wetland and constructed wetland were analyzed. The ecological restoration of Zhushanhu wetland in Taihu Lake was used as an example to illustrate the design process, main technical measures and restoration effects of near-natural ecological restoration. In the near-natural ecological restoration of Zhushanhu wetland, measures such as the improvement of hydrological and hydrodynamic conditions, the construction of basement forms, plant restoration, aquatic animal restoration, and biomass and species management were successively implemented. The connectivity and mobility of water bodies were improved, the habitat diversity and suitability were enhanced. The wave style basal morphology was constructed based on five types of basement morphology. According to the principles of suitable habitat, priority of water purification and consideration of landscape, 35 species of indigenous wetland plants from 21 genera were selected, and two plant configuration models were designed and used in Zhushanhu wetland restoration process. Based on the analysis results of Ecopath with Ecosim (EwE) model on the structure of wetland food web, some

收稿日期: 2021-12-16

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07101-009, 2017ZX07203-005)

作者简介: 李春华 (1977—), 女, 研究员, 博士, 主要从事湖泊生态修复与技术研究, 297535203@qq.com

* 责任作者: 叶春 (1970—), 男, 研究员, 博士, 主要从事湖泊富营养化治理和生态恢复理论与技术研究, yechbj@163.com

suggestions were put forward on regulating the harvest of aquatic plants and the population number of shrimps, crabs and fishes. After ecological restoration, the water quality of Zhushanhu wetland was improved from below Class V to Class II of *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002), and the diversity of large aquatic plants increased significantly. The ecological restoration effect of Zhushanhu wetland has proved the effectiveness of near-natural ecological restoration methods. In the future, it is necessary to continuously enrich the theory and technology of near-natural ecological restoration in practice and carry out large-scale practical applications.

Key words near-natural wetland technology; ecological restoration; basement morphology; Zhushanhu wetland; Taihu Lake

随着对湿地重要性认知的提高,我国新增或修复的湿地面积逐年增加。根据 2016 年 1 月原国家林业局的统计与规划报告,“十二五”期间我国湿地保护面积增加了 $2 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 自然湿地保护率提高至 46.80%, “十三五”期间达到了 50%, “十四五”期间将提高至 55%。在恢复或者重建湿地的实践中,近自然(near natural)理念逐渐得到重视并显现良好的效果。基于近自然理念的修复是介于人工与自然之间的技术范畴,也是人工师法自然的实践。由于近自然所具有的模糊性,近自然湿地生态修复尚缺乏精确的概念描述,作为一项技术的要点及应用效果也缺乏专业剖析。笔者在对近自然一词历史追溯的基础上,提出近自然湿地生态修复的概念,明确近自然湿地生态修复的理念和原则,以太湖竺山湖湿地为例,详细阐述近自然湿地生态修复的设计思路、原则、修复措施以及修复效果,为近自然湿地生态修复提供可推广、可复制的技术方法和实践模式。

1 近自然理念及近自然湿地生态修复概念

近自然的理念由来已久^[1],是近似或类似自然状态的意思。在生态环境领域,近自然的理念一直受到广泛关注^[2-4]。早在 1713 年,德国学者 Carlowitz 在可持续利用的提案中首次提出了近自然林业(near-natural forestry)概念,这是一种建立在植被生态学演替理论基础上的林业经营方法^[5]。1898 年德国林学家 Johann Karl Gayer 对残存的天然林进行研究后,提出近自然林业理论,该理论提出要用顺应自然的方式来恢复森林,从森林发育演替过程来对森林经营做出计划,充分发挥森林的自我恢复和自我调控功能,不断优化森林经营过程,从而使受到人为干扰的森林逐步恢复至近自然状态^[6]。1938 年德国学者 Seifert 提出近自然河溪整治的思想(near natural torrent control),其指能够完成传统河流治理任务并达到接近自然、低成本且保持景观美的一种治理方法^[7]。以上这些近自然方法在生态环境领域

的探索与应用,也为生态工程(ecological engineering)的概念奠定了重要基础。1962 年著名生态工程学家 Odum 定义了生态工程,即运用少量的辅助能量对某一系统进行调控,且该系统的主要能量还是来自于自然。也就是说生态工程是以自然调控为主、人为调控为辅的一种措施^[8-10]。

随着生态工程的兴起,20 世纪 80 年代,日本和我国台湾地区引入“近自然工法”,并将其广泛应用于工程建设、流域治理等方面^[11-12]。“近自然工法”强调工程措施实施中近自然材料的应用、景观美学的考量和各生态因子的统一和谐等,如在谷坊、拦沙坝的建设中,尽量避免用水泥、钢筋等,考虑用当地可及的柳桩、石头等材料^[6]。可见,“近自然工法”也属于生态工程,但是更强调近自然材料和技术的应用。

借鉴以上研究理念,可以将近自然湿地生态修复做如下定义:以原有自然湿地为基础或参照自然湿地的植被和水文条件,遵循自然法则和生态学原理,通过生态修复或适度的人工强化措施,因地制宜地提高湿地生物多样性、系统稳定性,有效改善湿地生态系统水质净化功能。

2 近自然湿地生态修复技术

2.1 近自然湿地生境改善技术

湿地生境是指湿地生物生活栖息的生态环境,湿地生境改善以生物恢复为目标。近自然湿地生境改善就是通过采取适度强化的技术措施,模拟自然湿地的结构、功能和过程,提高生境的异质性和稳定性,为湿地生物恢复提供良好的生存条件,保障湿地生态系统稳定运行,改善水环境质量。近自然湿地生境改善技术主要包括水文水动力改善技术、基底营造与改善技术和水质改善技术。

2.1.1 近自然湿地水文水动力改善技术

水在湿地的形成、发育、演替直至消亡的全过程中都发挥着直接而重要的作用^[13]。水文过程对维

持湿地生态系统的健康非常重要^[14]。湿地的水文水动力是其生态过程的主要非生物驱动因子,良好的水文水动力条件能够促进能量和营养物质的循环^[15]。近自然湿地水文水动力改善目的是满足水力停留时间和水位设计的要求,并兼顾起到活水的作用,以期达到更好的水质净化效果。近自然湿地水文水动力改善技术主要包括配水、导流、调节水力停留时间和水位变化、改善水动力条件、改善水系连通性和水流流态等技术措施。近自然湿地水文水动力改善常常与基底地形营造相结合。

2.1.2 近自然湿地基底营造与改善技术

湿地的基底是植物扎根的基础和重要营养源,是底栖生物的附着介质和栖息场所。湿地基底涉及湿地的水下底层部分和陆上的岸坡部分。水下的基底改善技术包括清淤、壤土回填、多孔性微生物载体铺设以及地形营造(例如基底高程设计、深槽-浅滩的构建营造)等技术。岸坡的基底改善技术主要包括边坡整理、护坡工程(例如石笼生态挡墙、生态袋柔性护岸及土工格室护岸)、径流拦截沟渠构建等^[16-17]。

2.1.3 近自然湿地水质改善技术

水质是湿地环境的重要指标,也是湿地生物非常重要的生境条件。与人工湿地以强化净化技术改善水质不同,近自然湿地水质改善技术以自然生态技术为主,人工强化净化技术为辅。其中,人工强化净化技术包括曝气、微生物菌剂调节、人工填料等,该类技术在近自然湿地系统管理过程中逐步过渡到免维护管理状态,甚至在水环境改善后可以撤除。

2.2 近自然湿地生物恢复技术

2.2.1 近自然湿地植物保育与恢复技术

湿地植物是湿地生态系统不可或缺的组成部分,在系统中起到输送氧气、抑制岸坡侵蚀和底泥再悬浮、同化吸收营养物质和污染物、释放碳化合物、蒸发水分等作用^[18-19],同时也为其他生物提供食物和栖息、繁育及避害环境。对于原有自然植物生长状态较好的湿地,优先采取自然封育措施,并清除病枯植株;对于新建湿地或现有植物很少的湿地,可以通过人工辅助措施提高植物覆盖率和生物多样性。

近自然湿地植物恢复技术主要包括植物的筛选、配置、种植、管护。植物筛选时要基于对植物物种的调查,选择土著物种纳入植物筛选库。自然湿地由陆地到水体依次分布着湿生植物、挺水植物、浮叶植物和沉水植物,因此也要根据水位变化选择适宜的植物物种^[20]。另外,还需要考虑植物的立地

条件,湿地的污染物削减、动物栖息地营造、水土保持等多种功能^[21]。物种筛选的具体方法可以借助查阅文献,也可以补充必要的植物筛选试验,选择最优的目标物种^[22]。近自然湿地植物配置是指筛选出植物的组合搭配方式。进行植物配置时,既要考虑符合生物学特性,又要兼顾季相变化、空间结构和景观效果;同时,要因地制宜、因时制宜,使植物正常生长,充分发挥其功能。近自然湿地植物种植时,需遵照不同植物的生长习性,选用种子、根茎进行种植,也可以采用移栽、分株、扦插等方式栽种^[23]。湿地修复过程中,要根据不同植物生长习性,结合当地气候、土壤、水质等因素,合理制定植物管护方案与计划;宜根据植物不同生长期调节水位,实施生态水位调控,确保湿地植物的繁育生长。一般在生态修复初期整个系统尚处于不稳定状态,或者水体中营养盐处于过剩状态,此时都需要对水生植物进行管理,如在植物衰亡前或遭到霜冻破坏前按一定面积比例进行收割,清理恶性竞争杂草,以维持合理的生物量和物种组成。

2.2.2 近自然湿地动物保育及恢复技术

近自然湿地的动物保育和恢复对象主要包括湿地鱼类、底栖动物和鸟类,重点关注濒危物种、稀有物种。新建湿地和已建湿地的动物保育及恢复技术有所不同,对于前者可能需要引入多种类的湿地动物,对于后者则有可能需要对现有动物物种进行补充或者对生物量进行调节。

近自然湿地动物保育及恢复技术主要包括关键动物物种的引入、栖息地营造技术和短期饵料投放。湿地动物物种的引入主要考虑土著濒危物种和稀有物种,同时可以在湿地生态系统营养等级及食物链平衡模型计算基础上,补充缺少的物种种类或者不足的生物量;在引入时要注意食物链的构建,根据生物习性按照一定的次序引入。栖息地营造要根据动物的觅食、营巢、繁衍、迁徙等活动规律来创造条件,营造适合各种动物的习性和生长的多样化生境。如鱼类栖息地营造包括人工鱼礁、洄游通道构建、索饵场构建、越冬场构建及产卵场构建等^[24-25];鸟类栖息地的营造可以从水深设计、植物配置、生态鸟岛等方面来考虑,在生态鸟岛上,除开展必需的保育、监测和必要的管理活动外,严格控制其他人为活动;底栖动物的栖息地营造主要从湿地基底的构建、植物配置上来设计。在湿地动物恢复初期可以适当投放其需要的饵料,确保幼体成活。除非濒危物种和稀有物种的恢复确有需要,否则不建议长期进行饵料投放。

2.2.3 近自然湿地生物量管理技术

生物量是某一时限任意空间所含生物体的总量。湿地生态系统中,群落或生态系统总生物量、各种群生物量及其在总生物量中的占比是评价湿地生态系统是否健康的重要指标。针对不同的生境条件,利用模型计算健康湿地生态系统中关键物种或种群的适宜生物量,通过调控管理湿地生态系统中不同类型生物种群或群落的生物量,将生态系统中各类生产者和消费者的生物量及其比例关系调节到系统稳定的阈值以内,以期抵消自然和人类的干扰所引起的不稳定现象。湿地生物量管理是生态调控的重要技术方法之一,主要包括植物调控、动物调控、微生物调控等^[26]。近自然湿地恢复中生物量管理主要涉及植物和动物的种群调控,通常是在生态修复初期、湿地生态系统没有达到稳定和自维持状态时,采取的一种人工辅助的技术手段。

3 近自然湿地生态修复的关键问题

3.1 与人工湿地的区别

近自然湿地与人工湿地在湿地要素的运用、人工措施的强弱、维护管理的需求等方面都有明显区别,详见表 1。

表 1 近自然湿地与人工湿地的主要区别

Table 1 Main differences between near-natural wetlands and constructed wetlands

项目	近自然湿地	人工湿地
要素运用	以自然恢复为主,人工措施为辅	以人工措施、设施的建设为主
措施强弱	强化、净化措施具有临时性(随着生态系统恢复,这些措施将逐渐被弱化、撤除)	强化、净化措施具有持久性
维护管理	最终发展为自维持的稳定湿地生态系统	需要定期维护、管理

3.2 遵循生态修复的“最速曲线”

“最速曲线”是物理学中得出的运动规律之一,也就是在重力作用下同一只小球最快到达底端的运动路线不是直线,而是一条曲线。这一规律已经在机械设计、经济学中得到了广泛应用^[27-30]。在湿地生态修复实践中,也存在“最速曲线”的规律。按照一定的先后顺序逐步改善生境条件实施湿地生态修复,往往比直接照搬自然湿地稳定状态的所有元素开展湿地生态修复,要更快速、顺利。生态修复措施实施的顺序、实施时机、实施强度与生境条件改善的程度等都会影响修复过程和修复效果。

3.3 避免“重建设、轻管理”,重视后期维护

近自然湿地修复项目的实施效果是否能够发挥

预期的生态功能,很大程度上依赖于后期的维护管理。如何维护修复后湿地系统使其处于最佳状态是亟待解决的问题。现阶段,我国湿地生态工程的运行管理与维护是薄弱环节^[31-34]。针对湿地生态建设工程运行中出现的资金保障不足、责任主体不清、设施管护不力等实际问题^[35-39],需通过制定管理制度、管护措施、考核办法、奖惩机制^[40-42],形成可以促进工程有效管护和长效运行的模式^[43],从而提升湿地恢复工程的长期效益。

4 近自然湿地生态修复示范实例

4.1 示范地点概况

以江苏省宜兴市的竺山湖湿地(120°00'54.40"E, 31°27'54.73"N)建设为例,阐述近自然湿地生态修复的原则、修复步骤及生态系统调控方法。竺山湖湿地位于太湖竺山湾缓冲带内,原为太湖疏浚底泥及建筑垃圾堆场,由于地势较低,经长期积雨形成了水深不足 0.5 m 的泥坑洼地,为劣 V 类(GB 3838—2002《地表水环境质量标准》)水体。洼地周边乔木以纯杨树林为主,伴有少量构树,林下草被主要由狗尾草群落和荻草群落组成。为了改善太湖周边环境,将该用地修复成新增湿地,总面积为 30 hm²,其中水域面积 6.07 hm²(图 1)。竺山湖湿地整体形状是一个不规则的长条形,长 1.8 km,平均宽度为 105 m。由于竺山湖湿地呈南北长、东西窄的条状,长边西侧为公路,东边是太湖大堤,因此分别在湿地北段和南段设置水质采样点。湿地北段的来水主要是 2 条小河流(湾浜、盛渎港),湿地南段的来水主要是西侧工业园区暴雨径流。

4.2 生态修复原则

竺山湖湿地的主要功能是改善区域生态环境状况,缓冲、滞留、净化上游来水。根据该功能定位,确定了竺山湖湿地建设的 4 条原则:1)因地制宜原则。利用原有底泥堆场规划构建水系地势,不外运土方,就近引太湖水作为湿地来水。2)生态优先原则。水系重建方式、湿地植被选择首先要满足生态功能。3)水系连通与水体净化相结合的原则。通过水系连通,拦截附近工业园区部分径流,并与北侧湾浜及盛渎港互通,达到净化周边污染物目的。4)兼顾景观原则。为居民提供休闲场所,融入美学元素。

4.3 基于近自然湿地修复理论构建修复步骤及目标

(1) 基于“最速曲线”构建生态修复步骤

根据湿地生态修复“最速曲线”的规律,不同湿地生态修复的措施及实施并不是固定、一成不变的,

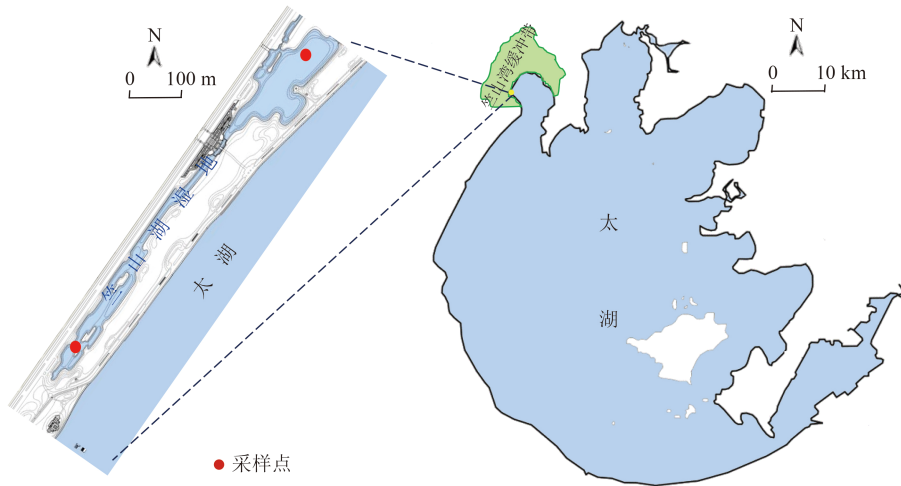


图 1 竺山湖湿地位置

Fig.1 Location of Zhushanhu wetland

需要根据湿地的具体情况,因地制宜地设定不同湿地恢复的“最速曲线”步骤。竺山湖湿地是新建湿地,周边没有强污染源,因此可以省去水质改善步骤,按照水文水动力改善—基底形态营造—植物保育与恢复—动物保育与恢复—生物量管理的顺序逐步实施修复措施,并使各步骤平滑衔接,促使生态恢复尽快达到设定的目标。

(2)以湿地运行达到自维持为恢复目标

自维持状态是指构建或恢复的生态系统可自主循环、自然衍生,逐渐形成自维持、免人力管护的生态系统状态^[44-45]。达到自维持状态几乎是所有生态修复项目运行维护的最终目标。在竺山湖湿地修复过程中,尽可能利用现有环境条件,因地制宜地创造生境条件,恢复湿地生物。如利用太湖清淤底泥铺筑湿地基底、引入湖水进入湿地时,同时将其中的鱼类、底栖动物带入,在生态恢复工程实施的第一年,使其自发生长、自我适应,减少人为干涉;经过 1 年的适应期之后,再对湿地中的食物网结构进行评估,判断是否需要人为干预。随着修复时间的增加,湿地基底的理化性质明显改善,水生植被覆盖率上升,为水生动物创造了更好的栖息环境,生物物种多样性增加,逐渐形成生态修复后的湿地自维持生态系统。

4.4 主要工程建设内容

4.4.1 水文水动力改善

新建竺山湖湿地主要净化对象为西南侧工业区的暴雨径流和西北侧的农田径流,因此竺山湖湿地的水文水动力改善,一方面要设计合适的湿地高程和水位,考虑承接来水和出水连通效果,并兼顾水力坡度和水体流动性。湿地内水的流向总体上是由南向北,在东北部的湿地出水口与入湖河流连通。另

一方面要考虑对上游来水和本地水体中污染物的净化效果。利用导流和水深、水体面积的变化调节水力停留时间和水流流态,提高生境的多样性和适宜性,便于生物生长并提高生物多样性。

4.4.2 湿地基底形态营造

湿地基底形态的不同,导致底泥-水界面的有效比表面积不同,从而影响基底生物膜的附着空间、微生物的种类、活性和泥水界面的物质交换,最终也会影响湿地系统对营养盐的净化效果。另外,基底形态还会影响基底光照强度的分布,进而影响水生植物的生长状态,导致湿地系统对营养盐去除效果的差异。总之,湿地基底形态可以改变水体流态,进而影响颗粒物沉降、污染物有效停留时间、污染物迁移转化途径等。

在工程实施前,进行了斜面型、平面型、凹面型、凸面型和多起伏型 5 种不同湿地基底形态(图 2)对污染物去除效果的分析。结果表明,5 种基底形态的总氮去除率依次为 28.84%、25.22%、27.07%、31.23% 和 35.23%,其中多起伏型基底更有利于污染物的去除^[46]。基于该研究结果,竺山湖新建湿地构建了多起伏型的基底形态,采取的技术手段包括生态

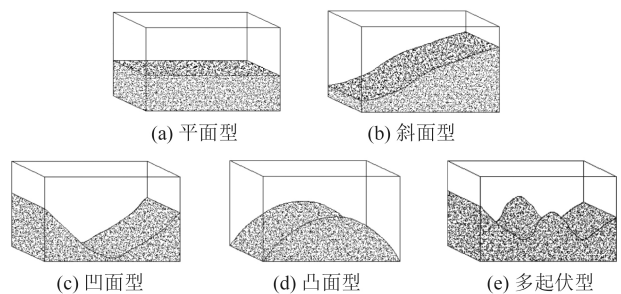


图 2 5 种不同湿地基底形态示意

Fig.2 Five types of basement structures of wetlands

淤积、基底坡度及深浅滩构建、基底材料的铺设等。

4.4.3 湿地植物恢复

基于文献查阅和实地调查,确定太湖地区湿地共有5个植被型组、11个植被型,群系超过78种。根据土著适生、净化水质、兼顾景观等选种原则,综合考虑物种对水分的耐受程度以及株型、大小、色彩、季相等因素,筛选出竺山湖湿地可用植物21属35种,包括垂柳(*Salix babylonica*)、落羽杉(*Taxodium distichum*)、池杉(*Taxodium distichum* var. *imbricatum*)、水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)、河柳(*Salix chaenomeloides*)、乌桕(*Sapium sebiferum*)、花叶柳(*Salix integra*)、簸箕柳(*Salix suchowensis*)、水杨梅(*Adina rubella*)9种木本湿生植物,鸢尾(*Iris tectorum* Maxim.)、狼尾草(*Pennisetum alopecuroides*)、大花美人蕉(*Canna generalis*)、燕子花(*Iris laevigata*)、竹节草(*Chrysopogon aciculatus*)5种草本湿生植物,芦苇(*Phragmites australis*)、茭白(*Zizania latifolia*)、花叶芦竹(*Arundo donax* var. *versicolor*)、千屈菜(*Lythrum salicaria*)、再力花(*Thalia dealbata*)、慈姑(*Sagittaria trifolia* var. *sinensis*)、黄菖蒲(*Iris pseudacorus*)、莲花(*Nelumbo nucifera*)、水烛(*Typha angustifolia*)、香蒲(*Typha orientalis* Presl)、雨久花(*Monochoria korsakowii*)、梭鱼草(*Pontederia cordata*)12种挺水植物,菱(*Trapa bispinosa*)、睡莲(*Nymphaea tetragona*)、白睡莲(*Nymphaea alba*)、莼菜(*Brasenia schreberi*)、芡实(*Euryale ferox*)5种浮水植物,苦草(*Vallisneria natans*)、黑藻(*Hydrilla verticillata*)、微齿眼子菜(*Potamogeton maackianus*)、轮叶狐尾藻(*Myriophyllum verticillatum*)4种沉水植物。

竺山湖湿地建设过程中主要采用2种植物配置模式:1)由滨水区到浅水区依次为大花美人蕉(4株/m²)、香蒲(4株/m²),伴生千屈菜(15株/m²),在湿地深水区上部形成莼菜群落(10株/m²),伴生菱角(10芽/m²),下部种植沉水植物苦草(40株/m²),伴生轮叶狐尾藻(5芽/丛,9丛/m²)。该模式的优势在于有效防止水土流失、固岸护坡的同时兼顾湿地景观效果,应用于竺山湖湿地北段。2)滨水区、浅水区依次为再力花(3株/m²)、芦苇(20株/m²),伴生黄菖蒲(4株/m²),在湿地深水区上部形成睡莲群落(2株/m²),伴生芡实(1株/4m²)和菱(15芽/m²),下部种植沉水植物黑藻(10~15芽/丛,10丛/m²),伴生轮叶狐尾藻(5芽/丛,9丛/m²)和微齿眼子菜(40株/m²)等。该模式的优势在于有效削减暴雨径流冲击,应用于竺山湖湿地南段。

4.4.4 湿地动物恢复

竺山湖湿地靠近太湖,湿地水源就近由太湖引入,在引水过程中带入了太湖的鱼类、贝类、微生物等,成为动物繁殖的种苗。考虑到新建湿地水生植物恢复期宜减少鱼类,故不引种鱼类。而底栖无脊椎动物如螺类、贝类有稳定底泥、减少底泥再悬浮的作用,有利于新生底泥微环境的恢复。根据调查结果得知,太湖大型底栖动物优势物种为河蚬(*Corbicula fluminea*)和铜锈环棱螺(*Bellamya aeruginosa*),其平均生物密度为100和13个/m²,平均生物量为105.5和21.8g/m²[47]。待水生植物恢复之后,参照该值在竺山湖湿地投入河蚬和铜锈环棱螺。由于竺山湖湿地是开放性场地,周围居民自发性投入了龙虾幼苗,在后期调查时发现湖湾东北端的龙虾数量较多,需要加强调控管理。另外,竺山湖湿地靠近太湖,为太湖常见水鸟黑水鸡(*Gallinula chloropus*)、小鸊鷉(*Podiceps ruficollis*)、白鹭(*Egretta garzetta*)、黄斑苇鳉(*Ixobrychus sinensis*)等提供了良好的栖息环境,湿地中恢复的水生植物和中小型水生动物可为水鸟提供食物,有利于水鸟的繁衍和生长。

4.4.5 湿地生物量管理

在对竺山湖湿地进行详细生物调查及开展室内模拟试验的基础上,建立了生态系统调控(EwE)模型。EwE模型是一种利用基于生态系统食物网结构的营养动力学原理,描述生态系统能量流动的平衡模式[48-49]。其将生态系统定义为由一系列具有生态关联的功能组组成,这些功能组主要包括浮游生物、鱼类、植物以及有机碎屑等,经过划分的所有功能组须能覆盖生态系统能量流动的全部过程[50-51]。在建模过程中假设该生态系统的总输入与总输出相等。该模型用1组线性联立方程来定义1个生态系统,每个线性方程代表生态系统中的1个功能组。经过模型的运算与处理,可以得出竺山湖湿地生态系统生态通道模型构建的基本输入与输出参数以及食物组成。在此基础上,采用EwE模型Ecopath模块中分析功能,分析竺山湖湿地生态系统食物网和营养级结构、生态系统能量转换效率、物质传递效率、各功能组的营养交互关系、生态系统的键种及总体特征。最后,根据模型分析结果,从生物量调控、食物链调控、生物多样性调控、生态系统结构调控4个方面制定竺山湖湿地生态系统调控方案[52]。工程实施第3年的调控措施包括:1)初级生产力明显过剩,将沉水植物、挺水植物分别收割40%及30%;2)湖

湾中缺乏草食性鱼类,而植物生物量过剩,因此提高草食性鱼生物量至原来的 5 倍,使沉水植物的生态营养效率提高 8.37%; 3) 将滤食性鲤科鱼类和杂食性鱼类的生态营养效率进一步提高,生物量分别增殖 50%; 4) 针对虾蟹类过剩的问题,减少 50% 的虾蟹生物量。

4.5 生态修复效果

4.5.1 水质改善情况

竺山湖湿地生态修复后,水质由修复前的劣 V 类改善为修复后的 II 类,水体中 TN 和 TP 浓度显著降低(图 3)。如竺山湖湿地北段的 TN 浓度平均值从生态修复前的 3.32 mg/L 降至生态修复后的 0.92 mg/L,湿地北段和南段 TN 浓度分别下降了 72.3% 和 58.9%,TP 浓度分别下降了 49.6% 和 60.7%。

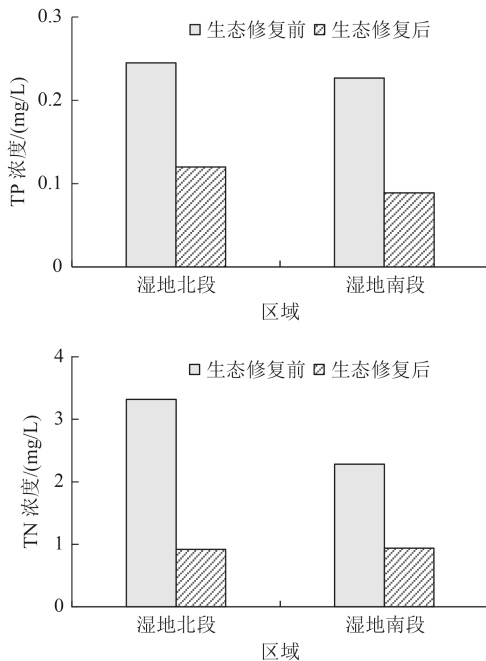


图 3 生态修复前后水体 TP 及 TN 浓度变化

Fig.3 Variation of concentration of TN and TP before and after ecological restoration

4.5.2 大型水生植物生物多样性改善情况

生态修复后竺山湖湿地大型水生植物多样性显著提高,湿地北段 Margalef 丰富度指数由生态修复前的 1.20 提高到生态修复后的 4.59,南段 Margalef 丰富度指数由生态修复前的 0.80 提高到生态修复后 3.75(图 4)。

4.5.3 景观效果

竺山湖湿地在改善生态环境的同时,景观效益也十分显著,水面常见白鹭觅食、群鸭戏水,成为周围居民时常眷顾的休闲场所。竺山湖湿地采取开放式无围墙设计,具有亲民性,湿地周围修建了一条自

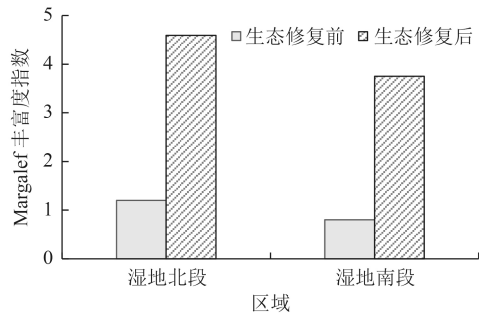


图 4 生态修复前后 Margalef 丰富度指数变化

Fig.4 Change in Margalef richness indices before and after ecological restoration

行车道,满足轻健身功能。湿地的乔灌木搭配呈现四季差异,春、夏、秋、冬各有别致。生态修复前后主体湿地景观对照如图 5 所示。



图 5 竺山湖湿地生态修复前后实景

Fig.5 Photos of Zhushanhu wetland before and after ecological restoration

5 结语

近自然湿地生态修复作为一种修复理念,是人与自然和谐共生的科学自然观的体现。与人工湿地技术相比,近自然湿地生态修复采用的人工措施或设施较少,且其采取的人工措施是临时性的,随着湿地生态系统的恢复,这些措施将逐步撤离。近自然湿地生态恢复应遵循“最速曲线”的规律,合理设计生态修复的措施和实施时序,以实现自我维持的目标。竺山湖湿地生态恢复的成功例证了近自然修复方法的有效性。今后还需不断在实践应用过程中丰

富近自然生态修复的理论与技术。

参考文献

- [1] KLÖTZLI F, GROOTJANS A P. Restoration of natural and semi-natural wetland systems in central Europe: progress and predictability of developments[J]. *Restoration Ecology*, 2001, 9(2): 209-219.
- [2] HENNIG D H. Natural and near natural tropical forest values[C]//USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-64. Fort Collins, CO, US: Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2011: 217-225.
- [3] SCHOU E, JACOBSEN J B, KRISTENSEN K L. An economic evaluation of strategies for transforming even-aged into near-natural forestry in a conifer-dominated forest in Denmark[J]. *Forest Policy and Economics*, 2012, 20: 89-98.
- [4] GRANT G. Near-natural drainage[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Ltd., 2016.
- [5] MIYAWAKI A. Restoration of urban green environments based on the theories of vegetation ecology[J]. *Ecological Engineering*, 1998, 11(1/2/3/4): 157-165.
- [6] 彭鸿, 张海峰. “近自然”生态工法理论和实践的发展与当今坡面整治技术的思考[J]. *山地学报*, 2005, 23(6): 6729-6735.
- PENG H, ZHANG H F. Development of theory and practice of eco-engineering and thoughts on present measures for slope control[J]. *Journal of Mountain Research*, 2005, 23(6): 6729-6735.
- [7] 高甲荣, 肖斌. 荒溪近自然管理的景观生态学基础: 欧洲阿尔卑斯山地荒溪管理研究述评[J]. *山地学报*, 1999, 17(3): 244-249.
- GAO J R, XIAO B. Principles of landscape ecology in near natural torrent management[J]. *Journal of Mountain Research*, 1999, 17(3): 244-249.
- [8] ODUM H T, ODUM B. Concepts and methods of ecological engineering[J]. *Ecological Engineering*, 2003, 20(5): 339-361.
- [9] MITSCH W J. Ecology, ecological engineering, and the Odum brothers[J]. *Ecological Engineering*, 2003, 20(5): 331-338.
- [10] MITSCH W J. Energy flow in a pulsing system: Howard T. Odum[J]. *Ecological Engineering*, 1994, 3(2): 77-83.
- [11] 黄琼彪. 环境伦理与生态工法[J]. *水土保持研究*, 2005, 12(5): 7-15.
- HUANG Q B. Environmental ethics and ecological engineering method[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12(5): 7-15.
- [12] 段红东, 王建平, 李发鹏. 国外生态水利工程建设理念、实践及其启示[J]. *水利发展研究*, 2019, 19(7): 64-67.
- [13] 张仲胜, 于小娟, 宋晓林, 等. 水文连通对湿地生态系统关键过程及功能影响研究进展[J]. *湿地科学*, 2019, 17(1): 1-8.
- ZHANG Z S, YU X J, SONG X L, et al. Impacts of hydrological connectivity on key ecological processes and functions in wetlands: a general review[J]. *Wetland Science*, 2019, 17(1): 1-8.
- [14] TRIGG M A, MICHAELIDES K, NEAL J C, et al. Surface water connectivity dynamics of a large scale extreme flood[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 505: 138-149.
- [15] 崔保山, 蔡燕子, 谢焱, 等. 湿地水文连通的生态效应研究进展及发展趋势[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 52(6): 738-746.
- CUI B S, CAI Y Z, XIE T, et al. Ecological effects of wetland hydrological connectivity: problems and prospects[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2016, 52(6): 738-746.
- [16] 张莉, 张杰龙. 以栖息地修复为导向的湿地公园设计方法: 以云南省保山市青华湿地为例[J]. *景观设计学*, 2020, 8(3): 90-101.
- ZHANG L, ZHANG J L. Wetland park design for habitat restoration: case study on the qinghua wetland in Baoshan, Yunnan Province[J]. *Landscape Architecture Frontiers*, 2020, 8(3): 90-101.
- [17] 生态环境部. 关于印发《河湖缓冲带生态保护修复技术指南》的通知: 环办水体函[2021]558号[A/OL]. (2021-12-15)[2021-12-20]. http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202112/t20211215_964234.html.
- [18] 潘福霞, 来晓双, 李欣, 等. 不同湿地植物脱氮效果与根际土壤微生物群落功能多样性特征分析[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(6): 1497-1503.
- PAN F X, LAI X S, LI X, et al. Nitrogen removal efficiencies and rhizosphere soil microbial community functional diversities of different plants in constructed wetlands[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(6): 1497-1503.
- [19] 徐治国, 何岩, 闫百兴, 等. 湿地植物对外源氮、磷输入的响应研究[J]. *环境科学研究*, 2007, 20(1): 64-68.
- XU Z G, HE Y, YAN B X, et al. Response of wetland plants to nitrogen and phosphorus inputs[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, 20(1): 64-68.
- [20] YE C, YU H C, KONG H N, et al. Community collocation of four submerged macrophytes on two kinds of sediments in Lake Taihu, China[J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(11): 1656-1663.
- [21] RODRIGO M A. Wetland restoration with hydrophytes: a review[J]. *Plants (Basel, Switzerland)*, 2021, 10(6): 1035.
- [22] 黄晓艺. 基于四重筛选法的生态修复适宜水生植物筛选研究: 以无锡滨湖区出入湖河口为例[D]. 南宁: 广西大学, 2019.
- [23] 叶春, 李春华. 太湖湖滨带现状与生态修复[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [24] 杜建刚, 赵宪钧. 加强水生野生动物保护与管理 促进水生生物资源恢复与发展[J]. *河南水产*, 2009(3): 3-4.
- [25] 方冬冬, 邹远超, 危起伟. 多维视角下的水生野生动物保护与利用探析[J]. *中国水产科学*, 2020, 27(8): 980-1002.
- FANG D D, ZOU Y C, WEI Q W. Protection and utilization of aquatic wildlife from a multi-dimensional perspective[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2020, 27(8): 980-1002.
- [26] 郭士林, 叶春, 李春华, 等. 湿地生态系统调控研究综述[C]//2015年中国环境科学学会学术年会论文集(第二卷). 北京: 中国环境科学学会, 2015: 46-52.

- [27] 吕金霞, 王文杰, 蒋卫国, 等. 湿地可恢复性评价方法及其应用: 以天津滨海新区为例[J]. *环境工程技术学报*, 2020, 10(1): 9-16.
LÜ J X, WANG W J, JIANG W G, et al. Methodology study on the wetland restorability evaluation and its application in Binhai New Area, Tianjin City[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2020, 10(1): 9-16.
- [28] 赵大鹏, 吴金泽. 从“原生态”到“伪生态”的实践谬误[C]//多元与包容: 中国城市规划年会会议论文集. 北京: 中国城市规划学会, 2012: 1-8.
- [29] 刘志勇, 边军辉, 刘培国. Mathematica 在最速降线问题中的应用[J]. *西安文理学院学报(自然科学版)*, 2013, 16(1): 91-94.
LIU Z Y, BIAN J H, LIU P G. On the application of Mathematica in brachistochrone[J]. *Journal of Xi'an University of Arts & Science (Natural Science Edition)*, 2013, 16(1): 91-94.
- [30] 徐雷. 最速下降曲线实验[J]. *教育教学论坛*, 2018(4): 190-191.
XU L. The brachistochrone curve experiment[J]. *Education Teaching Forum*, 2018(4): 190-191.
- [31] NISHIYAMA Y. The brachistochrone curve: the problem of quickest descent[J]. *Osaka Keidai Ronshu*, 2011, 61(6): 309-316.
- [32] 王建华, 田景汉, 李小雁. 基于生态系统管理的湿地概念生态模型研究[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(2): 738-742.
WANG J H, TIAN J H, LI X Y. Study of wetland conceptual ecological models based on ecosystem management[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(2): 738-742.
- [33] 洪德志. 保障湿地生态系统稳定发展管理模式研究[J]. *科技创新与应用*, 2012(18): 94.
- [34] 白洁, 马静, 徐基良, 等. 我国湿地保护管理现状与优化对策[J]. *世界林业研究*, 2012, 25(4): 58-62.
BAI J, MA J, XU J L, et al. Current status and optimization strategies of wetland conservation and management in China[J]. *World Forestry Research*, 2012, 25(4): 58-62.
- [35] JANSSEN R, GOOSEN H, VERHOEVEN M L, et al. Decision support for integrated wetland management[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2005, 20(2): 215-229.
- [36] KHONDOKER S. Wetland management in Bangladesh: a study on Beel Bakar[J]. *Agriculture, Forestry and Fisheries*, 2014, 3(4): 320.
- [37] 谭正洲. 昆明市官渡区湿地保护与管理对策研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2020.
- [38] FITZSIMMONS O N, BALLARD B M, MERENDINO M T, et al. Implications of coastal wetland management to nonbreeding waterbirds in Texas[J]. *Wetlands*, 2012, 32(6): 1057-1066.
- [39] O'BRIEN L, MCGINNESS H M. Ibis and spoonbill chick growth and energy requirements: implications for wetland and water management[J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2019, 27(5/6): 725-742.
- [40] COHEN-SHACHAM E, DAYAN T, de GROOT R, et al. Using the ecosystem services concept to analyse stakeholder involvement in wetland management[J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2015, 23(2): 241-256.
- [41] MA Q F, CUI L J, SONG H T, et al. Wetland protection in Beijing, China: the importance of legislation[J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2015, 23(6): 1005-1013.
- [42] BARAKAGIRA A, de WIT A H. The role of wetland management agencies within the local community in the conservation of wetlands in Uganda[J]. *Environmental & Socio-Economic Studies*, 2019, 7(1): 59-74.
- [43] DAWSON L, ELBAKIDZE M, SCHELLENS M, et al. Bogs, birds, and berries in Belarus: the governance and management dynamics of wetland restoration in a state-centric, top-down context[J]. *Ecology and Society*, 2021, 26: 8.
- [44] 赵英, 柴陆军, 王新民. 植被自维持生态修复技术与应用效果[C]//中国环境科学学会科学与技术年会论文集(第三卷). 北京: 中国环境科学学会, 2017: 4135-4137.
- [45] WITZANY G. International journal of signs and semiotic systems[J]. *Biological Self-Organization*, 2014, 3: 1-11.
- [46] 孔祥龙, 叶春, 李春华, 等. 凹形基底自然湿地中理化指标的分布特征[J]. *环境污染与防治*, 2015, 37(12): 45-50.
KONG X L, YE C, LI C H, et al. The distribution characteristics of physicochemical index in concave base natural wetland[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2015, 37(12): 45-50.
- [47] 许浩, 蔡永久, 汤祥明, 等. 太湖大型底栖动物群落结构与水环境生物评价[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(5): 840-852.
XU H, CAI Y J, TANG X M, et al. Community structure of macrozoobenthos and the evaluation of water environment in Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(5): 840-852.
- [48] CHRISTENSEN V, PAULY D. Flow characteristics of aquatic ecosystems[J]. *Trophic Models of Aquatic Ecosystems*, 1993, 26: 338-352.
- [49] CHRISTENSEN V, WALTERS C J. Ecopath with Ecosim: methods, capabilities and limitations[J]. *Ecological Modelling*, 2004, 172(2/3/4): 109-139.
- [50] OUYANG L J, LIU W, WANG Y B. Primary establishment of EWE model in Caohai Nature Reserve[J]. *Meteorological and Environmental Research*, 2011(7): 1-4.
- [51] DENG L, LIU S L, DONG S K, et al. Application of Ecopath model on trophic interactions and energy flows of impounded Manwan Reservoir ecosystem in Lancang River, southwest China[J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2015, 30(2): 281-297.
- [52] LI C H, XIAN Y, YE C, et al. Wetland ecosystem status and restoration using the Ecopath with Ecosim (EwE) model[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 658: 305-314. ◇