自然与人的协同共生之舞

——三峡库区汉丰湖消落带生态系统设计与生态实践

Dance of Nature and Man's Synergistic Symbiosis: Ecosystem Design and Ecological Practice of Littoral Zone of Hanfeng Lake in Three Gorges Reservoir Area

袁兴中 杜春兰 袁嘉 王晓锋 熊森 黄亚洲 刘杨靖 高磊

Yuan Xingzhong, Du Chunlan, Yuan Jia, Wang Xiaofeng, Xiong Sen, Huang Yazhou, Liu Yangjin, Gao Lei

摘要：三峡水库蓄水后水位季节性波动给消落带带来了极大的环境胁迫，包括对水库自然环境的不利影响和对库区移民生存质量的影响。本文以三峡库区重庆开州区汉丰湖为例，基于协同进化、协同共生及水敏性设计等生态学原理，针对汉丰湖水位变化特点，将汉丰湖消落带作为一个整体生态系统，进行了消落带生态修复设计及工程实践。9年的观测研究表明，人与自然合作进行的汉丰湖消落带生态系统设计及营建，发挥了地表径流水质净化、生物多样性保育、稳定湖岸、美化景观等多种生态服务功能。不同水位时期优美的消落带及滨湖景观，为开州城区居民提供了良好的休闲、观赏、游憩场所，这个移民城市的人居环境质量得到了不断优化和改善。由于充分吸纳了原住民对消落带及滨水空间的良好意愿，使得消落带生态修复及景观优化这一生态实践活动融入开州城区这个社会大系统中，成为社会系统和谐的重要组成部分，从而实现了人与自然协同共生之舞的目标。

Abstract: The seasonal fluctuation of the water level in the Three Gorges reservoir (TGR) has brought great environmental stresses to the littoral zone, including adverse effects on the natural environment of the reservoir and the life quality of migrants in the reservoir area. Taking Hanfeng Lake in Kaizhou District of Chongqing in TGR as an example, based on the principles of co-evolution, symbiosis and water sensitive design, and aiming at the characteristics of water level variation of Hanfeng Lake, the research took the fluctuation zone of Hanfeng Lake as a whole ecosystem, and carried out ecological restoration design of the fluctuation zone and ecological engineering practice. The observation and study lasting nine years show that the ecosystem design and construction in the littoral zone of Hanfeng Lake, carried out by human and nature cooperation, has played a variety of ecological service functions, such as surface runoff water purification, biodiversity conservation, lakeside stabilization, landscape beautification and so on. The beautiful littoral zone and lakeside landscape at different water levels provide a good place for leisure, sightseeing and recreation for the residents of Kaizhou city. The quality of human settlements in this immigrant city has been continuously optimized and improved. As a result of fully absorbing the good will of the aborigines to the littoral zone and waterfront space, the ecological practice of ecological restoration and landscape optimization of littoral zone and waterfront zone have been integrated into the social system of Kaizhou city, becoming an important part of the harmony of social system, thus realizing the goal of the co-existence dance of human and nature.

关键词：消落带；生态系统设计；生态实践；协同共生；汉丰湖；三峡库区

Keywords: Littoral Zone; Ecosystem Design; Ecological Practice; Synergistic Symbiosis; Hanfeng Lake; The Three Gorges Reservoir Area

中央高校基本科研业务费专项项目“三峡库区消落区生态修复及综合管理调控”(2018CDJCZX 06)，国家自然科学基金青年科学基金项目“山地城市水敏性区域草本植物群落适应性设计研究”(51808065)，国家科技重大专项“汉丰湖流域生态防护带建设关键技术研究示范”(2013ZX07104-004-05)

作者：袁兴中（通信作者），重庆大学资源及环境科学学院教授、博士生导师，长江上游湿地科学研究重庆市重点实验室主任，重庆千洲生态研究院名誉院长。1072000659@qq.com

杜春兰，重庆大学建筑城规学院教授，重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室

袁嘉，英国谢菲尔德大学景观学院博士，重庆大学建筑城规学院讲师，重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室

王晓锋，博士，重庆师范大学长江上游湿地科学研究重庆市重点实验室，讲师

熊森，重庆市开州区汉丰湖国家湿地公园管理局，教授级高级工程师

黄亚洲，重庆市开州区汉丰湖国家湿地公园管理局，高级工程师

刘杨靖，重庆千洲生态环境工程有限公司，工程师

高磊，重庆千洲生态环境工程有限公司，高级工程师

引言

“协同进化”(co-evolution)一词最初来自对捕食者与猎物物种间关系的研究和理解^[1]。在自然界,捕食者与猎物之间是一种协同进化关系。所谓协同进化是指生物个体的进化过程是在其环境选择压力下进行的,而环境不仅包括非生物因素,也包括其他生物,因此一个物种的进化必然会改变作用于其他生物的选择压力,引起其他生物也发生相应的变化,这些变化又反过来引起相关物种的进一步适应性变化;在很多情况下两个或更多相互作用物种在进化过程中常常形成一个相互作用的协同共生系统,即彼此之间相互有利,这种基于协同进化过程的关系,我们称之为“协同共生”(synergistic symbiosis)^[2]。长期以来,长江三峡作为一个自然与人的协同进化系统,自然环境各要素之间、自然与人之间形成了一个相对稳定的协同共生系统,这是指三峡工程建成蓄水前;长江江岸作为水与陆的界面,具有重要的生态服务功能,江岸顺应长江的自然演变规律,与人类社会交互作用,江岸—河流—人类社会长期协同进化形成协同共生体。

举世闻名的三峡工程的兴建以及由此形成的巨大水位变动,使得蓄水前位于江岸之上、土壤最为肥沃的高地,因蓄水而成为一个季节性水位变动、冬季淹没长达5~6个月的水库消落带^[3]。这一变化不仅仅是巨大的物理变化——无论是理化环境,还是生物个体生存、生物群落结构、生态系统格局以及功能,都发生了沧桑巨变。自2010年三峡水库完成175m试验性蓄水后,形成了水位落差达30m的消落带,导致了一系列生态环境问题。消落带的问题不仅仅是深水淹没对植物生存的考验,面对季节性水位变化的消落带复杂难解问题(wicked problems),我们需要技术的支撑,需要了解冬季深水淹没的严酷条件下耐淹植物筛选技术、植被构建技术、生态恢复技术,国内外众多学者开始了在这一区域的艰难探索。目前,国内外对水库消落带的研究实例还较少。国外对水库消落带的研究主要集中在水位变动对大型水生植被结构和组成的影响^[4],湖泊水位变动对消落带种群动态的影响^[5],等等。国内对三峡水库消落带的研究主要集中在近十年对三峡水库消落带的土地利用、岸坡稳定、土壤污染、耐淹植物的生理生态特性等方面^[6-9]。国际上高度关注三峡水利枢纽工程,生态环境问题是最引人瞩目的方面,重点和关键又是消落带生态环境问题,事关百万移民安稳和库区经济社会发展、国家形象和声誉。然而,这一区域的复杂问题远非单纯科技手段所能解决。三峡库区一直是人地关系紧张的区域,失去耕作熟土(现在的消落带区域)的就地后靠移民在每年水位消退季节,盲目在消落带这一极其脆弱的区域进行粗放式耕种。耕作导致水土流失,使用农药、化肥、杀虫剂产生

面源污染,这一切都是对三峡水库水质的极大威胁。在消落带区域,科学与社会的冲突异常剧烈。那么,消落带生态修复应如何整合社会系统的需求?通过生态系统设计如何回应社会需求,社会共识又是如何影响生态系统设计?面对前所未有的复杂问题,唯有科学引导,寻求人与自然、科学与社会的协同进化,才是解决消落带复杂问题的最佳选择。

长江生态大保护战略的提出,为长江经济带绿色发展指明了方向;三峡库区生态环境是长江生态大保护的关键,消落带恢复治理是重中之重。三峡水库消落带面临着季节性、30m落差的大幅度水位变动和冬季深水淹没的严酷环境胁迫,如何重建消落带这一新的河岸系统的协同共生关系,是亟待解决的关键科学问题及工程技术问题。作者所在团队选择位于三峡库区腹心区域的重庆开州区汉丰湖消落带,基于协同进化及共生等生态学原理,将汉丰湖消落带作为一个整体生态系统,通过持续9年的生态修复及景观优化设计和工程实践,重建相对稳定的消落带协同共生系统。本文综合评估了自汉丰湖消落带生态系统设计营建以来的实验成果,以期对具有季节性水位变化的湖库消落带生态修复和景观优化提供科学参考。

1 三峡蓄水之变

由于防洪、清淤及航运等需求,三峡工程实行“蓄清排浑”的运行方式,即夏季低水位运行(145m),冬季高水位运行(175m)(图1)。因而,在145—175m高程的库区两岸,形成与天然河流涨落季节相反、涨落幅度高达30m的水库消落带。三峡水库消落带面积达348.9km²,是我国面积最大的水库消落带,涉及三峡水库干、支流岸线6000km。由于每年水位季节性大幅度消涨,夏季出露,冬季深水淹没,使消落带生态环境、景观质量发生巨大变化,导致一系列生态环境问题^[10],如消落带原有生物减少与消失,陆岸库区污染物在消落带阻滞积累转化和再溶入水库对水质的威胁,长期水位变动导致的库岸失稳并诱发次生地质灾害,库岸带移民人居环境和景观质量衰退,等等。

图1 三峡水库及汉丰湖年度水位变化示意图

在三峡库区一级支流中, 澎溪河消落带面积最大, 从重庆云阳县澎溪河口, 到重庆开州区澎溪河支流南河的平安溪, 形成周长 385.46 km、面积 55.47 km² 的消落带。开州区消落带面积大、类型多、生态环境问题复杂; 此外, 开州区人口密度大, 消落带与人居环境交互影响。为了化害为利, 最大程度地减缓消落带的不利影响, 充分利用消落带为我们带来的生态机遇, 开州区政府在城区下游 4.5 km 处的丰乐街道乌杨村修建水位调节坝, 将水位消涨幅度由 30 m 降至 4.72 m, 形成独具特色的“城市内湖”——汉丰湖^[11], 并形成典型的双重水位变化, 即冬季三峡水库高水位运行时, 汉丰湖水位维持在 175 m 水位; 夏季当三峡水库水位消落到 145 m 时, 水位调节坝下闸蓄水, 汉丰湖水位保持在 170.28 m。这是一个典型的动态水位变化, 冬季, 当三峡水库坝前水位达到 175 m 时, 汉丰湖水位调节坝的坝上(汉丰湖)、坝下(澎溪河)水位都是 175 m; 夏季, 当三峡水库坝前水位下降到 145 m 时, 因水位调节坝的作用, 坝上(汉丰湖)水位维持在 170.28 m, 而坝下(澎溪河)水位下降到 145 m。

2 自然与人的协同共生目标

针对汉丰湖面临的一系列生态环境问题, 以及开州城市生态文明建设的要求, 紧紧围绕生态系统服务功能的全面优化目标^[12], 本着对自然和人类都有益的设计理念, 应对水位变化和不断变化的环境, 进行汉丰湖消落带生态系统整体设计和生态实践。我们的设计目标是: 整合社会系统对人居环境质量改善优化的需求, 有效发挥消落带作为水陆动态界面的污染净化、库岸稳定、生物多样性保育、景观美化等功能, 全面优化和提升消落带生态系统服务功能, 满足自然和人的功能需求, 让这个移民城市的居民生活更幸福。设计重点在环汉丰湖消落带及滨水空间, 重点针对消落带及滨水空间岸坡稳定、环境净化、生物多样性提升、景观美化、人居环境质量优化等主导生态服务功能, 针对水位变化影响下的水文

过程、河—库交替影响下的泥沙过程、水位变化影响下的理化过程、蓄水影响下的生物过程等生态过程, 从 2010 年开始, 我们进行了汉丰湖消落带生态系统结构、功能和过程的整体设计和生态实践。整体设计和实验强调以消落带生态系统的自我设计为主, 人工调控为辅; 强调自然与人协同共生; 在设计过程中, 充分吸纳当地原住民的需求, 让原住民直接参与设计和生态实践过程。

3 汉丰湖消落带生态系统设计实验

3.1 整体设计框架——山水林田湖草城生命共同体

汉丰湖位于开州城区内东河与南河交汇处, 乌杨桥水位调节坝之上(图 2)。汉丰湖为典型的城市内湖, 正常蓄水位时(175 m 水位)总面积 14.48 km², 西起乌杨岛水位调节坝, 东至南河大邱坝; 南以新城防护堤高程 180 m 为界, 北到老县城所在的汉丰坝; 涉及汉丰街道办事处、丰乐街道办事处、镇东街道办事处、白鹤街道办事处、后坝镇、镇安镇等 6 个街、镇。开州城市与汉丰湖水乳交融, 水是城市发展的重要影响因子, 城市因水而生, 也可能因水而衰。将汉丰湖的保护、景观优化与城市建设整合起来, 建设一个富有特色的湿地之城, 这也是开州区城市生态文明建设的需求。因此, 汉丰湖消落带的生态修复及景观优化, 不能单纯从消落带本身孤立考虑, 而应将湖周山地第一层山脊、面山汇水区域、城市、滨水空间、消落带、湖泊水体作为整体生态系统的有机组成要素, 进行“山、水、林、田、湖、草、城”生命共同体设计(图 2, 图 3)。

汉丰湖“山、水、林、田、湖、草、城”生命共同体设计中, 山是指汉丰湖南岸的南山、北岸的大慈山、盛山和迎仙山, 汉丰湖“四山”是生命共同体的生态源(物种源、水源、营养物质源); 水是汉丰湖生态系统设计中的核心, 由汉丰湖上游源头东河、源自“四山”的溪河与汉丰湖一起构成向心状水系网络; 林、草是生态系统中的生产者, 湖周面

图 2 汉丰湖“山、水、林、田、湖、草、城”生命共同体设计概念示意图

图 3 汉丰湖“山、水、林、田、湖、草、城”生命共同体各要素间的关系示意图

山汇水区域的林、草既是生物多样性的摇篮，也是山与水、水与城之间有机联系的生态走廊；沿湖周山地等高线分布的梯田农地，发挥着拦截水土、稳定坡面的作用；城则是一个有着千百年历史文化积淀的移民新城，城市中人的健康生存与山、水、林、田、湖、草各要素密切相关，协同共生。在这个整体生态系统设计，最关键的要素是作为水陆界面的消落带及滨水空间。消落带及滨水空间是汉丰湖的水陆交错界面，将山、水、林、田、草、城与湖有机衔接，是这个生命共同体的动态界面。

自 2010 年开始，综合考虑湖周山、水、林、田、草各生态要素，考虑城市人居环境质量优化，考虑这个移民城市居民的生活质量及休闲游憩需求，在此基础上，对消落带和滨水空间这一动态界面进行设计和实验。按照这一界面的组成和环境特点，其设计和实验分别包括湖岸、湖湾、入湖支流河口的消落带，由此构成一个整体的环湖消落带生态系统。湖岸、湖湾、入湖支流河口消落带的设计和实验各自具有自己的适应性特点，又构成一个完整的环湖生态和景观界面。

3.2 适应水位变化的多功能生态湖岸设计

3.2.1 石龙船大桥段景观基塘水岸

借鉴“桑基鱼塘”传统农业文化遗产和中国乡村多塘系统生态智慧，自 2011 年起，设计并实施了汉丰湖岸景观基塘系统。充分利用消落带冬水夏陆特点，在消落带缓平的湖岸坡面上构建水塘系统，塘的大小、深浅、形状根据自然地形和湖岸消落带生态特征确定^[13]。塘内筛选适应于季节性水位变动，具有环境净化、景观美化等功能的湿地植物，主要植物种类包括：太空飞天荷花（为消落带定向培育）、水生美人蕉（*Canna glauca*）、鸢尾（*Iris tectorum*）等水生植物。景观基塘系统从汉丰湖石龙船大桥南岸至芙蓉坝、石龙船大桥北岸至头道河段均有分布，形成汉丰湖水陆界面的一道湿地屏障（图 4）。消落带景观基塘系统的设计，不仅满足了这一水陆界面的生态服务功能需求，而且极大地消解了消落带出露期不良景观的不利影响，通过美化优化，为市民提供

了一个良好的观赏、休闲、游憩的场所。

3.2.2 汉丰湖北岸多带多功能缓冲系统

在汉丰湖北岸乌杨坝一带，在消落带及滨水空间设计多带多功能缓冲系统。海拔 170 m 以下以消落带自然恢复为主；海拔 170~175 m 的消落区设计林泽带（以耐水淹的乔木、灌木为主），种植池杉（*Taxodium Ascendens*）、落羽杉（*Taxodium distichum*）、乌桕（*Sapium sebiferum*）、杨树（*Populus L.*）等乔木，以及秋华柳（*Salix variegata*）、中华蚊母（*Distylium chinense*）等灌木，形成复合林泽带，林下以自然恢复的耐水淹狗牙根（*Cynodon dactylon*）、牛筋草（*Eleusine indica*）、合萌（*Aeschynomene indica*）等草本植物为主；消落带以上海拔 175~176 m，临近高水位的水际线设计高草草本植物带，前期稀疏种植耐水淹的高大芭茅（*Miscanthus floridulus*），后期以其自然恢复为主；海拔 176~180 m，设计复合混交植被带，以杨树、柳树（*Salix matsudana*）等本地乔木为主，形成乔—灌—草复层混交群落，留有自然恢复的空间，以尽可能在后期让土壤种子库发挥作用，利于本地植物自然恢复。由此，形成“170 m 以下消落带自然恢复草本植被带 + 170~175 m 消落带复合林泽带 + 175~176 m 临水高草草本带 + 176~180 m 复合混交植被带”湖岸多带多功能缓冲系统。在设计中除了考虑固岸护岸、景观优化、环境净化等功能外，还将鸟类、鱼类和昆虫等野生生物生境设计考虑其中。汉丰湖北岸乌杨坝海拔 175 m 是一个坡度转折点，175 m 以下是连续缓平消落区，175~180 m 区域是坡度为 40° 的护坡。在 170~175 m 消落带设计中，其前缘以抛石形成多孔隙水岸，有利于鱼类及水生无脊椎动物栖息；在 172~175 m 以土石材料进行了地形塑造，在护坡前缘的 175 m 区带形成了宽度为 5~6 m 的凹道，凹道两侧均以抛石结构稳固，由此形成高水位期鱼类的良好越冬栖息场所，低水位出露季节鹭类、鸕鹚类等涉禽栖息的良好场所；176~180 m 复合混交植被带，由于植物多样性丰富，且以本地乡土植物为主，层次结构复杂，因此成为各种昆虫、林鸟、猛禽栖息的良好生境。自 2013

图 4 汉丰湖南岸石龙船大桥段消落带景观基塘（左：高水位淹没期；右：夏季出露期）

年设计并实施汉丰湖北岸乌杨坝多带多功能缓冲系统以来,系统结构稳定,多功能生态效益、社会效益明显,成为开州城区居民休闲、观鸟的良好场所(图5)。

3.2.3 汉丰湖南岸湖岸小微湿地群

开州城区是典型的水敏性城市,除了在消落带实施相关生态恢复工程外,消落带以上区域的城市滨水空间生态设计也非常重要。基于汉丰湖水水质保护需求,根据水敏性城市设计和水敏性生态建设原理,在汉丰湖南岸从游泳馆至水位调节坝,在海拔175~178 m的滨水空间设计并营建环湖小微湿地群,包括雨水花园、青蛙塘、蜻蜓塘、生物沟、生物洼地(图6)。

环湖小微湿地植物搭配以水生和耐湿植物为主,包括水生美人蕉、鸢尾、石菖蒲(*Acorus tatarinowii*)等种类。每个小微湿地面积在10~80 m²,镶嵌分布在175~178 m高程带。该区域不会被蓄水淹没,滨水特点使得该区域在污染净化及提供生物生境(如作为青蛙、蜻蜓等动物的栖息地)方面具有重要作用;同时也是滨湖公园景观系统的重要组

成部分,是开州城区居民观赏湿地动植物,接受科普教育的良好场所。

3.3 生态湖湾设计

选择汉丰湖南岸芙蓉坝湖湾,在海拔160~180 m区域,基于污染净化、生物多样性保育、景观美化等多功能需求,从整体生态系统规划角度,设计和建设“环湖小微湿地+林泽—基塘复合系统”(图7,图8),这是一个具有圈层状结构的多功能湿地,即芙蓉坝环湖多维湿地生态系统^[5]。自2011年以来,持续不断地进行着这一复合多维湿地系统的设计和营建。

2011年设计并实施消落带林泽—基塘复合系统,在海拔160~175 m消落区,构建多功能基塘系统,塘底进行微地形设计,以增加生境异质性。在塘与塘之间设置潜流式水流通道,以保证基塘系统内部各塘之间,以及塘与湖间的水文连通性。塘基上栽种耐水淹木本植物,包括中山杉(*Taxodium hybrid*)、池杉、落羽杉等耐水淹乔木,此外在基塘系统上部175~177 m高程环带状种植中山杉和落雨杉,形成网状林泽。

图5 汉丰湖北岸乌杨坝段消落带多带多功能缓冲系统(上:2014年夏季出露;中:2015年冬季淹没;下:2018年冬季淹没)

图6 汉丰湖南岸环湖小微湿地(左上:2014年环湖生物沟建设前;右上:2018年环湖生物沟;左中:2015年环湖生物塘建设之初;右中:2018年环湖生物塘;左下:环湖蜻蜓塘;右下:环湖生物洼地)

2015年在175~178 m高程设计并营建环湖小微湿地群。“环湖小微湿地+林泽—基塘复合系统”在设计和建设过程中为自然留足了空间,让自然的自我设计功能得以充分发挥。芙蓉坝“环湖小微湿地+林泽—基塘复合系统”自上而下,从消落带以上的滨水空间,至消落带下部,形成一个多功能的多维湿地生态系统。

3.4 入湖支流河口生态设计

汉丰湖入湖支流河口是连接湖周山地汇水区域的重要生态节点。从湖周山地汇水区域汇流而来的径流,通过入湖河口段进入汉丰湖,直接影响着汉丰湖的水质。支流河口段既

是鱼类生存繁殖的重要水域,也是水鸟集中的区域。从“山水林田湖草城”生命共同体整体生态系统设计角度,对汉丰湖所有入湖支流河口都进行以河口湿地为主的生态系统设计。自2011年以来,对汉丰湖北岸较大的支流头道河入湖河口,进行了以“多塘湿地系统+消落带护岸植被+河口景观基塘”为主的生态系统设计和营建(图9)。

在海拔175 m以上的头道河口上游段(头道河大桥下),根据地形和用地条件,设计并实施了多塘湿地系统,在发挥地表径流净化、提供生物生境等生态服务功能的同时,也具有景观美化、科普教育、休闲观赏等功能。在173~175 m消落区,设计并实施了消落带护岸植被营建,种植以秋华柳为主的耐水淹灌木与水生美人蕉、鸢尾及自然恢复生长的草本植物混交的植被带。从多塘湿地地区至河口,在海拔172~173 m消落区,设计并实施了河口景观基塘。

4 协同共生之舞——实验结果的可持续性

汉丰湖消落带生态修复及景观优化是一个基于协同进化及共生等生态学原理的整体生态系统设计,前期以人工设计进行生态修复和景观优化的引导,后期以消落带生态系统的自我设计为主,人工调控为辅;通过消落带各自然要素之间,以及人与消落带及滨水空间之间的协同进化,形成一个相对稳定、生态服务功能高效、景观美化优化的协同共生系统。自2010年三峡水库175 m高水位蓄水以来,开始汉丰湖消落带生态系统设计及生态实践,迄今为止,发挥了地表径流

图7 俯瞰汉丰湖南岸芙蓉坝环湖的小微湿地+林泽—基塘复合系统

图8 汉丰湖南岸环湖芙蓉坝的小微湿地+林泽—基塘复合湿地系统(左上:2015年冬季淹没期;右上:2015夏季出露期;左下:2017年4月;右下:2018年6月)

水质净化、生物多样性保育、稳定湖岸、美化景观等生态服务功能，且由于消落带生态系统的自我设计功能开始发挥，生态服务功能持续优化，表现出了实验结果的良好可持续性。不同水位时期优美的消落带及滨湖景观，为开州城区居民提供了良好的休闲、观赏、游憩场所，这个移民城市的人居环境质量得到了不断优化和改善。

(1) 所筛选的耐水淹植物能很好地适应季节性水位变化和冬季深水淹没。筛选出了一批耐冬季水淹和季节性水位变化的消落带适生植物物种，包括合萌、狗牙根等草本植物 10 余种，秋华柳、中华蚊母等耐水淹灌木 5 种，池杉、落雨杉、中山杉、乌桕、杨树、柳树等耐水淹乔木 6 种。所选植物兼具环境净化功能和景观美化价值，迄今为止这些植物在汉丰湖已经历了九年水淹考验，每年冬季淹没在水下，夏季出露后自然萌发生长，目前存活状况良好。

(2) 对地表径流污染净化效果显著。结合国家科技重大专项的需求，2015 年 6~9 月委托重庆市万州区环境监测站对汉丰湖石龙船大桥段景观基塘系统、芙蓉坝“环湖小微湿地+林泽—基塘复合系统”进行了水质取样和分析，水质监测分析表明，石龙船大桥段景观基塘对地表径流总氮（TN）和总磷（TP）的削减率分别达到 44% 和 37%，芙蓉坝复合湿地系统对总氮（TN）和总磷（TP）的削减率分别达到 54% 和 52%。可见，景观基塘系统和“环湖小微湿地+林泽—基塘复合系统”不仅提供了景观优化功能，同时在汉丰湖与城市地表径流污染源之间构成了一道拦截屏障，有效削减了

入湖污染负荷。

(3) 生物多样性保育成效明显。汉丰湖消落带生态系统结构优良，生物多样性提升效果明显。在消落带种植的耐水淹乔灌木经历了多年季节性水位变动和冬季水淹，存活状况良好，群落结构稳定，生物多样性提升效果明显。到目前为止，芙蓉坝区域高等维管植物达到 79 种，鸟类种类及种群数量增加，基塘、林泽等生境结构单元及立体生境空间的形成，为涉禽、游禽、鸣禽等不同生态位的鸟类营造了栖息、觅食乃至繁殖的生境，最终提高了整个芙蓉坝区域的鸟类多样性。汉丰湖实施消落带生态系统设计及营建后，在汉丰湖观察到的鸟类超过 130 种^[14]，其中湿地鸟类超过 50%，发现中华秋沙鸭（*Mergus squamatus*）、小天鹅（*Cygnus columbianus*）、鸳鸯（*Aix galericulata*）等珍稀濒危水鸟，汉丰湖已成为三峡库区乃至长江上游重要的水鸟越冬地。

(4) 景观优化成效显著，社会效益明显。汉丰湖消落带生态系统设计实验除了注重耐水淹植物筛选和面源污染防控外，尤其注重生态服务功能的全面优化提升，实现消落带生态修复与滨水空间景观建设和人居环境质量优化协同共生。目前，汉丰湖消落带及滨水空间景观品质优良，成为汉丰湖周边开州城区居民良好的休闲区域。

(5) 消落带生态修复及景观优化的生态实践成为稳定移民的重要手段。开州区是三峡库区的移民大县，开州新城是一个整体搬迁的移民城市，解决移民的稳定生活及优化其人居环境质量是三峡库区社会稳定非常重要的方面。持

图9 汉丰湖北岸头道河口生态工程（左上：2010年头道河口实施生态恢复前；右上：2014实施恢复后的多塘湿地；左下：2014年河口景观基塘系统施工中；右下：2018年头道河口景观基塘系统全景）

续九年的汉丰湖消落带生态修复及景观优化生态实践, 不仅使生活在汉丰湖畔的城市居民感受到了优美生态环境质量带来的幸福感, 而且由于充分吸纳了原住民对消落带及滨水空间的良好意愿, 使得消落带生态修复及景观优化这一生态实践活动融入开州城区这个社会大系统中, 成为社会系统和谐的重要组成部分, 从而实现了人与自然协同共生之舞的目标。

汉丰湖消落带生态系统设计实验和生态实践有效解决了三峡库区城镇段消落带耐水淹植物筛选、适应水位变化的消落带生态系统修复技术、景观优化关键环节存在的技术难题, 切实保障了三峡库区生态环境安全和城市消落带景观品质, 优化了城市人居环境质量。汉丰湖消落带生态系统设计实验和生态实践, 是人与自然合作的结果, 是人与自然协同共生之舞。汉丰湖消落带已经成为开州城市自然—社会—生态复合生态系统的重要组成部分, 已经形成了一个相对稳定的社会生态系统, 如何可持续管理这个社会生态系统, 让其生态服务功能持续优化, 这将是一个长期的生态系统设计和生态实践。

5 结语

汉丰湖消落带生态系统设计及营建, 不仅解决了三峡库区城镇段消落带生态恢复与景观建设的难题, 创新性地构建了大型水库城镇段消落带生态修复与景观优化技术体系, 为大型湖库消落带生态修复及滨水空间景观优化提供了可推广、可复制的技术方法及生态实践模式, 拓展和创新了逆境生态设计和景观生态修复理论, 而且极大地优化美化了城镇人居环境质量, 真正实现了三峡库区城镇人民幸福生活及社会稳定的目标。富有生态智慧的消落带景观基塘系统、多带多功能缓冲系统、滨水空间小微湿地群、“环湖小微湿地+林泽—基塘复合系统”生态湖湾、“多塘湿地系统+消落带护岸植被+河口景观基塘”入湖支流河口生态工程, 是应对季节性水位变化、优化生态服务功能的重要技术和生态实践模式。在三峡水库消落带设计并实施的生态工程, 不仅仅是一种生态恢复措施, 更强调生态系统结构、功能和过程的整体设计, 以及生态系统服务功能的持续优化提升。长达9年的汉丰湖消落带生态系统设计实验表明, 只有对自然和人类都有益的模式才是最好、最可持续的。UPI

注: 文中图片均为作者绘制或拍摄。

参考文献

- [1] 孙儒泳. 普通生态学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.
- [2] ODUM E P, BARRETT G W. 生态学基础 [M]. 第五版. 陆健健, 王伟, 王天慧, 等译. 北京: 高等教育出版社, 2009.

- [3] 刁承泰. 三峡水库水位消落带土地资源的初步研究 [J]. 长江流域资源与环境, 1999, 8(1): 75-79.
- [4] FERNÁNDEZALÁEZ C, FERNÁNDEZALÁEZ M, BÉCARES E. Influence of water level fluctuation on the structure and composition of the macrophyte vegetation in two small temporary lakes in the northwest of Spain [J]. Hydrobiologia, 1999, 415: 155-162.
- [5] NASELLI-FLORES L, BARONE R. Importance of water level fluctuation on population dynamics of cladocerans in a hypertrophic reservoir (Lake Arancio, southwest Sicily, Italy) [J]. Hydrobiologia, 1997, 360: 223-232.
- [6] 李殿球, 孙春霞, 蒋建东. 三峡水库消落区土地防护利用规划及其评价 [J]. 人民长江, 1999, 30(11): 18-20.
- [7] 涂建军, 陈治谏, 陈国阶. 三峡库区消落带土地整理利用——以重庆开州为例 [J]. 山地学报, 2002, 20(6): 712-717.
- [8] 张建军, 任荣荣, 朱金兆, 等. 长江三峡水库消落带桑树耐水淹试验 [J]. 林业科学, 2012(5): 154-158.
- [9] 王强, 袁兴中, 刘红, 等. 三峡水库初期蓄水对消落带植被及物种多样性的影响 [J]. 自然资源学报, 2011(10): 1680-1693.
- [10] YUAN X Z, ZHANG Y W, LIU H, et al. The littoral zone in the Three Gorges Reservoir, China: challenges and opportunities [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20: 7092-7102.
- [11] 袁嘉, 袁兴中, 王晓锋, 等. 应对环境变化的多功能湿地设计——三峡库区汉丰湖湖湾湿地生态系统建设 [J]. 景观设计学, 2018, 6(3): 76-88.
- [12] MITSCH W J, LU J J, YUAN X Z, et al. Optimizing ecosystem services in China [J]. Science, 2008, 322: 528.
- [13] LI B, XIAO H, YUAN X, et al. Ecological and commercial benefits analysis of a dike-pond project in the drawdown zone of the Three Gorges Reservoir [J]. Ecological Engineering, 2013, 61: 1-11.
- [14] 刁元彬, 刘红, 袁兴中, 等. 水位变动影响下三峡库区汉丰湖鸟类群落及多样性 [J]. 生态学报, 2018, 38(4): 1382-1391.

(本文编辑: 张祎娴)