

适应水位变化的库岸生态防护带设计 ——以重庆汉丰湖为例

Design of Reservoir Bank Ecological Protection Zone Adapting to Water Level Changes —A Case Study of Hanfeng Lake in Chongqing

扈玉兴 袁兴中* 刘 红 王可洪 王 芳 程苒登 侯春丽
HU Yuxing YUAN Xingzhong* LIU Hong WANG Kehong WANG Fang CHENG Lideng HOU Chunli

基金项目:
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”(编号: 51808065)
重庆市住房和城乡建设委员会科技项目“主城区‘清水绿岸’项目扩展预可研”(编号: 20C01512)

文章编号: 1000-0283 (2021) 06-0074-07
DOI: 10.12193/j.laig.2021.06.0074.011
中图分类号: TU986
文献标识码: A
收稿日期: 2021-01-10
修回日期: 2021-02-27

扈玉兴
1995年生/女/山东东营人/重庆大学建筑城规学院硕士在读/研究方向为大地景观规划与生态修复(重庆400030)

袁兴中
1963年生/男/四川万源人/重庆大学建筑城规学院教授, 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/从事生态系统设计、湿地生态学、生态工程学研究(重庆400030)

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: 1072000659@qq.com

摘要

三峡水库蓄水后, 水位季节波动给消落带造成了极大的环境胁迫, 大大削弱了消落带的生态屏障功能。在消落带及其以上临近区域构建生态防护带可以有效降低水土流失程度, 削减库区农业面源污染, 有利于保障三峡水库的生态环境安全, 促进可持续利用。以重庆开州区汉丰湖北岸乌杨坝段库岸为例, 研究反季节水位变动背景下的库岸生态防护带建设的模式和方法, 提出多带多功能缓冲系统模式。阶段性实验研究结果表明, 多带多功能缓冲系统面临冬季深水淹没及夏季高温干旱交替的逆境, 植被种类、植被结构均表现出良好的韧性适应, 有效发挥了湖岸稳固、水质净化、生物多样性保育及景观美化优化等综合生态服务功能, 可为具有季节性水位变动的湖、库岸带生态修复提供科学依据及技术范式参考。

关键词

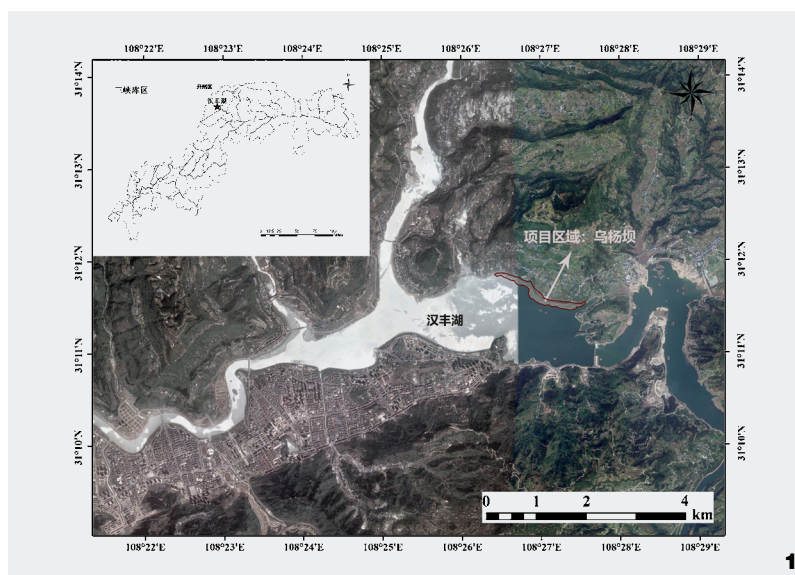
消落带; 生态防护带; 多带多功能缓冲系统; 重庆汉丰湖

Abstract

The seasonal fluctuation of the water level in the Three Gorges reservoir (TGR) has brought great environmental stresses to the littoral zone, the ecological defense function of the littoral zone is weakened or lost. So, in the littoral zone and its above neighboring region, the construction of ecological protection zone can decrease the soil erosion and levels of the agricultural non-point source pollution, which is beneficial to the ecological environment safety and sustainable utilization of Three Gorges Reservoir. Taking the reservoir bank of Wuyangba section on the northern shore of Hanfeng Lake in Kai County, Chongqing as object, this paper studied the restoration mode and method of the reservoir bank ecosystem in the off-season water level fluctuation background and proposed the multi-stripe, multi-functional buffer system. The results proved the success of the multi-stripe, multi-functional buffer system in facing the adversity of deep water inundation in winter and alternating high temperature and drought in summer, both plant species and vegetation structure showed good resilience and adaptability, and the comprehensive ecological service functions such as lake shore stability, water purification, biodiversity conservation, and landscape optimization were effectively exerts. This study was a new exploration of ecological bank structure in drawdown zone, providing a scientific basis and technical paradigm reference for the ecological restoration of lakes and reservoirs with seasonal water level fluctuations.

Key words

littoral zone; ecological protection zone; multi-functional buffer system; Hanfeng Lake



1. 汉丰湖乌杨坝地理位置图

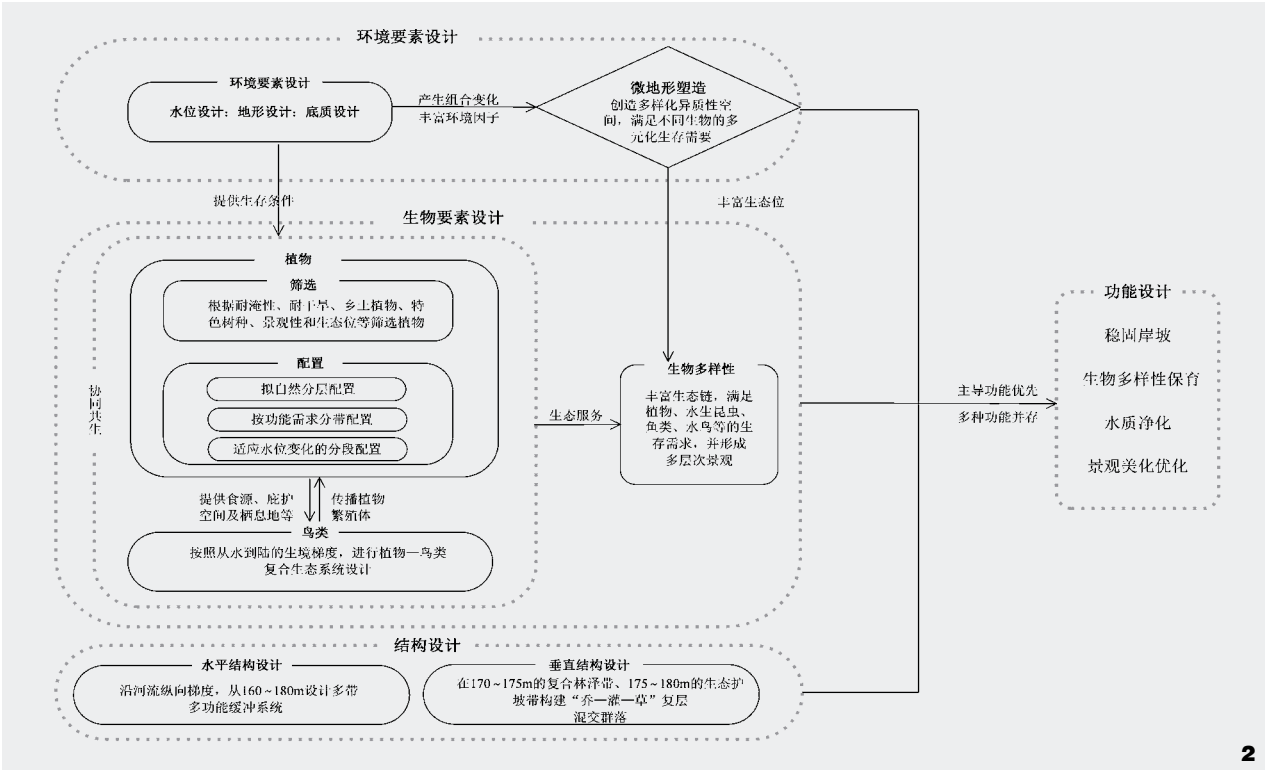
受三峡水库蓄水影响,在库区干支流两岸形成水位落差达30 m的消落带,其中重庆开州区的消落带面积最大,达58 km²,涉及11个乡镇^[1]。在大幅度的水位落差、长时间的冬季深水淹没、夏季出露期高温干旱等干扰胁迫下,消落带生态系统受到严重影响^[2]。土壤侵蚀、水体富营养化、生物多样性衰退、景观品质降低等问题使得三峡水库消落带的修复工作变得极为迫切^[3]。为最大程度减缓消落带造成的不利影响,开州区政府于2010年在新城区澎溪河下游4.5 km处的乌杨村修建了水位调节坝,原澎溪河水位落差由30 m降至4.72 m,由此形成了独具特色的“城市内湖”——汉丰湖^[4]。汉丰湖是三峡水库蓄水后形成的库中库,其水文变化特征受三峡大坝和汉丰湖水位调节坝的双重水位调节控制^[5]。按照河岸带的定义,库岸带包括消落带及其以上河水影响消失为止的植被地带。因此,库岸生态防护带系指在库岸带(包括高程较高的消落带及其以上的陆域部分),结合一定的人工措施,构建土壤—植被防护体系,以实现管理目标的区域^[6]。

为了应对季节性水位波动带来的环境影响,有效维持汉丰湖湖岸结构稳定和水环境安全,在促进消落带生态恢复的同时提升开州区人居环境质量,项目组开展了重庆开州区汉丰湖北岸乌杨坝段的库岸生态防护带设计,并提出多带多功能缓冲

系统模式。项目于2013年初完成设计,下半年开始地形施工,2014年初完成植物栽种。截至2020年底,多带多功能缓冲系统已经历了6年的反复淹没,经受住了严酷的逆境考验,逐步适应了冬季深水淹没和夏季高温干旱等多重胁迫,有效发挥了固岸护岸、水质净化、生物多样性保育和景观美化优化等功能。文章对反季节水位变化背景下的库岸生态防护带设计进行总结,以期对具有季节性水位变化的湖、库岸带植被重建及生态修复提供科学依据和技术范式参考。

1 项目概况

研究区位于重庆市开州区汉丰湖北岸乌杨坝(图1),地处亚热带湿润季风气候区,年平均气温为10.8 ~ 18.5℃,年降水量约为1 200 mm。在三峡工程蓄水之前,乌杨坝下部高程较低处为典型的河漫滩区,河底以细沙和卵石为主。因长期挖沙采石,场地内采石坑和砂石堆交混分布,河漫滩原生地貌被完全破坏。乌杨坝上部高程较高区域是受洪泛影响的河岸过渡高地,当地居民习惯进行季节性耕种。在2010年三峡工程完成175 m蓄水之后,每年10月中旬至翌年1月中旬,乌杨坝在海拔高程175 m以下的区域会被淹没,该区域水位变化为30 m。2012年,汉丰湖水位调节坝建成,直到



2. 多带多功能缓冲系统设计框架

2017年正式运行, 将夏季水位维持在170.28 m, 水位变化为4.72 m。乌杨坝段距离开州新城较远, 且周围无密集居民区, 人为干扰强度较低, 已经成为开州区野生生物尤其是鸟类的主要栖息地^[7]。

针对湖岸稳固、水质净化、生物多样性保育、景观美化优化等综合生态服务功能的需要, 汉丰湖北岸乌杨坝段库岸生态修复存在以下问题:

- (1) 三峡水库运行后, 库区的水文情势发生显著变化, 原有河流生态系统逐渐演变成水库生态系统, 原有河岸带被永久淹没, 在库区陆域形成新的“库岸带”, 原有河流型生物因不适应生存条件的改变而濒危甚至消失;
- (2) 冬季深水淹没, 夏季出露期高温带来极大的生态威胁, 生活在原有河岸环境中的物种难以适应汉丰湖消落带的新环境;
- (3) 长期的季节性变化对库岸稳固产生较大不利影响;

(4) 来自陆域集水区的地表径流携带面源污染物经消落带进入湖中, 严重威胁水环境安全。

2 库岸生态防护带设计策略

基于汉丰湖北岸乌杨坝段的场地现状调查, 进行库岸生态防护带设计, 提出多带多功能缓冲系统模式。适应水位变化的库岸整体生态系统设计包括功能、要素和结构设计等(图2), 整体长度约2 km, 宽度超过100 m, 呈连续带状, 集固岸护岸、地表径流污染净化、生态缓冲、生物多样性保育及景观优化等生态服务功能于一体。

2.1 功能设计

遵循岸坡稳固、生物多样性保育、水质净化等主导功能优先, 局部气候改善、景观美化优化、公众科普教育等多功能并存的原则, 进行功能设计。

2.1.1 岸坡稳固

缓冲带植被地下交织的根系可以增加库岸的稳定性和抗剪、抗冲能力,能够有效防止水土流失;植被的树冠能够有效截留降水,同时阻挡雨滴直接撞击地表;植被的枯枝落叶能够减缓降雨对地表的溅蚀与地表径流的冲刷。

2.1.2 生物多样性保育

通过构建适宜的生境条件,为植物、水生昆虫、鱼类和水鸟等提供栖息地和庇护场所。多孔隙水岸可为鱼类和水生无脊椎动物提供良好的栖息环境;凹道在冬季高水位期间能够成为鱼类越冬栖息场所,夏季出露季节,低水位则成为鹭类、鸬鹚类等涉禽栖息的良好场所;林泽中的树木冠层可为苍鹭、中白鹭、鸬鹚等提供停栖地;林泽中林窗设计形成的明水面可为斑嘴鸭、绿头鸭等提供良好的庇护、休憩场所。在175~180 m处进行生态护坡设计时,以本地乡土植物为主营建的优良生境隔离带,可以削弱外界人为干扰强度,为林鸟及猛禽提供生态位。

2.1.3 水质净化

生态防护带中基质、植物和微生物等通过协同作用,经过滤、拦截、土壤吸附、植物吸收、化学反应等过程实现对泥沙的拦截,去除氮、磷等元素。树木产生的枯枝落叶等凋落物进入水中能够缓慢释放营养盐,对维持水生态系统稳定性具有关键作用。此外,树木通过光合作用产生的氧气能够传输到根部

并释放到水中,增加湖水的氧气含量。沟渠、洼地、浅水塘、凹道等湿地结构对陆地地表径流具有一定程度的净化作用。

2.1.4 景观美化优化

芭茅(*Miscanthus floridulus*)是当地乡土植物,适应性强,耐水淹能力强,栽植于175~176 m处,冬季水淹季节可形成充满野趣、优美的临水高草草本带,也可为前来越冬的水鸟提供栖息和避难场所。

2.2 要素设计

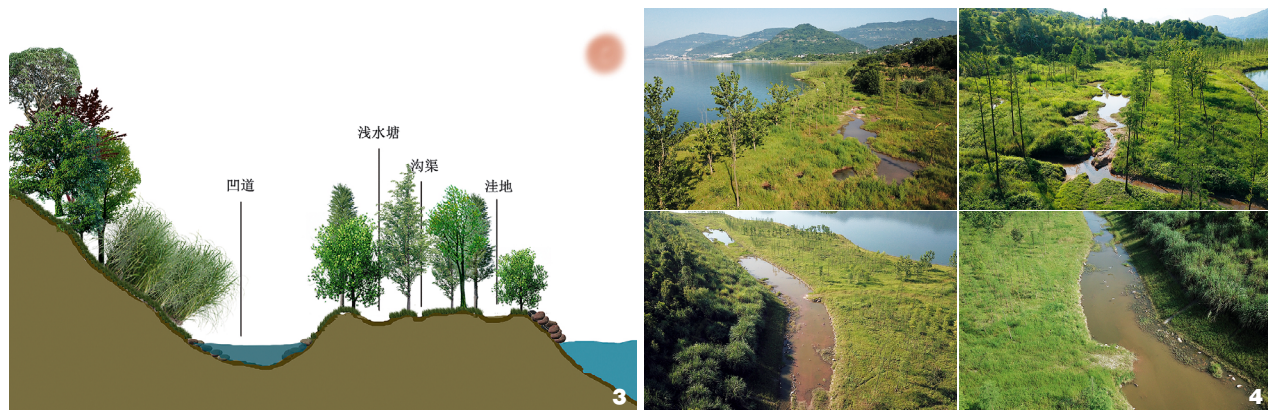
景观格局中各个景观要素的设计是不可忽视的内容,按照景观元素分类,库岸景观可以分为地形景观、植被景观和水体景观等。

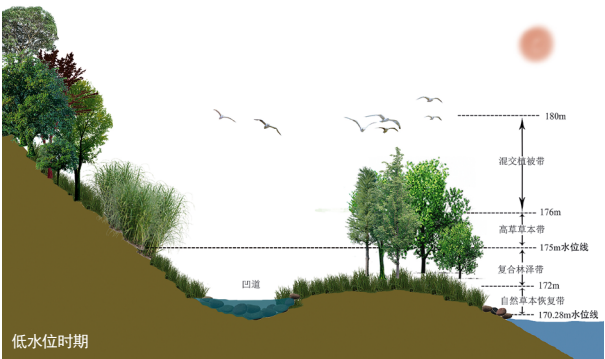
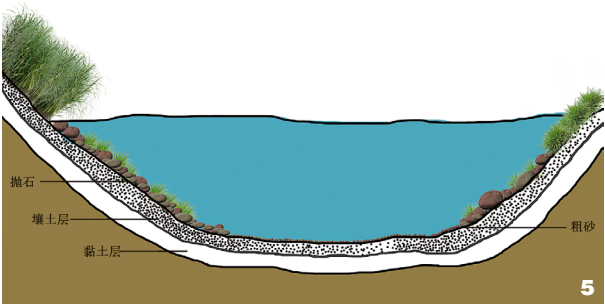
2.2.1 地形设计

汉丰湖北岸乌杨坝海拔175 m是一个坡度转折点,175 m以下是连续平缓的消落区,175~180 m区域是坡度约为40°的护坡。在175 m以下的消落区设计中,选取土石材料,利用小型挖掘机以及人工进行地形设计和塑造。根据反季节、周期性的水位变化,结合湿地植物生长需求以及水生无脊椎动物、鱼类和水鸟的觅食和产卵生境需求,将回水洼地、沟渠、浅水塘、凹道、潟湖等水文地貌结构有机镶嵌,形成起伏的地形(图3)。这些湿地结构既是河流洪水的消纳空间,也是净化陆地地表径流,并提供多样性生物种类栖息、觅食的良好场所(图4)。

3. 地形设计示意图

4. 地形设计完成后实景图





5. 底质凹道设计示意图
6. 植物设计示意图

2.2.2 底质设计

在长期淹没或持续的水流冲刷条件下，单纯依靠植物很难达到长期保护土壤和繁衍生物的效果，因此，需要借助一定的工程措施来维持岸坡稳定。在170~172m的消落带前缘用抛石形成多孔隙水岸；在40°护坡前缘营造宽度为5~6m的凹道，其两侧用抛石进行稳固(图5)。这些卵石、块石不仅为

鱼、虾、昆虫等提供多孔隙空间，也能够为喜静水产卵的鱼类提供良好的产卵场所。此外，石块表面附着的微生物膜能够有效降解有机污染物，对汉丰湖水质的维持具有重要作用。很多鸟类需要吞咽少量沙子来帮助消化植物性食物。因此，为了满足鸟类的特殊习性，对一些完全是淤泥质的底质，在局部区域斑块状铺设粗砂，形成有利于鸟类生存的镶嵌状底质斑块。

2.2.3 植物设计

汉丰湖消落带冬涨夏落的水位变化规律与多数植物冬季休眠、夏季生长的节律相吻合，这为消落带植物的生存提供了机会。(1) 筛选的植物不仅能够耐受冬季深水淹没，水退后能迅速恢复生长，而且夏季出露季节时，在完全干旱的坡面环境还能够存活；(2) 这些植物既能够为鸟类和昆虫提供食物，也能为其提供栖息、庇护生境；(3) 植物提升了景观观赏价值。植被景观是库岸景观的重要组成部分，也是景观环境变化的敏感标志。因此，充分考虑植被季相变化，建立生态化、多样化的滨河景观模式，避免形成单一的景观效果。综合考虑以上因素，并结合对场地现状的调研，项目组选取乔木包括池杉(*Taxodium distichum* var. *imbricatum*)、落羽杉(*Taxodium distichum*)、杨树(*Populus simonii* var. *przewalskii*)、乌桕(*Triadica sebifera*)、柳树(*Salix babylonica*)等，灌木包括秋华柳(*Salix variegata*)、中华蚊母树(*Distylium chinense*)等，草本植物以自然恢复为主。根据消落带适生植物生长特性、水位变动及功能需求等分层、分段、分带配置(图6)，整体恢复效果如图7所示。

2.3 结构设计

自然河岸带一般由河岸草甸、河岸灌丛以及河岸乔木林构成带状结构特征的缓冲区，对于河流生态系统健康的维持具有重要作用^[8]。研究发现，植被缓冲带通过吸收、阻滞、过滤和转化等作用，可以有效截留氮、磷等污染物^[9]。当宽度达到5m时，可以有效减少地表径流中泥沙和氮含量，当宽度达到9m时，则能进一步减少径流中磷的含量^[10-11]。河岸缓冲带具有重要的生境功能，宽度达到45m时，可以维持河岸鸟类种群的稳定性^[12]。此外，缓冲带植物的根系能够有效防止水土流失，并且乔、灌、草形成的复杂垂直结构能够通过枝叶截留、蒸(散)发等作用在一定程度上延

缓降水形成径流的时间,从而起到削峰滞洪的作用^[13]。因此,构建河岸缓冲带已经成为一种常用的岸线生态修复策略^[14-15]。基于此,对乌杨坝库岸水平结构和垂直结构进行以下设计:

2.3.1 水平结构设计

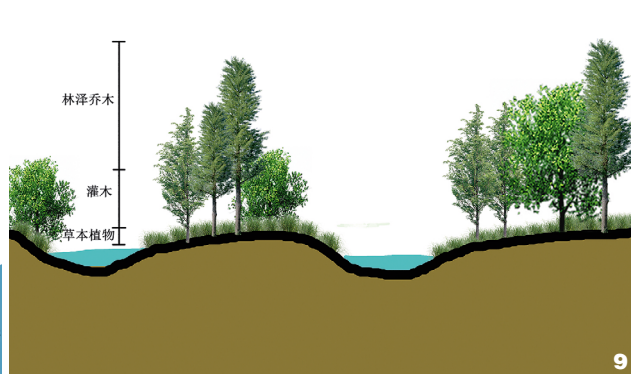
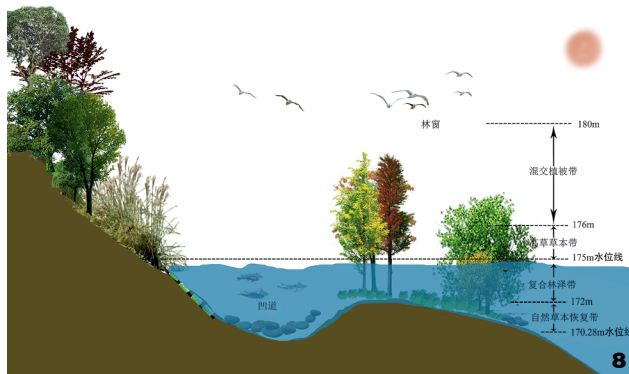
在水平结构上,沿高程梯度设计湖岸多带多功能缓冲系统,包括“消落带自然恢复草本植被带(170 m以下)+消落带复合林泽带(170~175 m)+临水高草草本带(175~176 m)+复合混交植被带(176~180 m)”。其中,复合林泽带是临水高草草本带和复合混交植被带的外延,将河岸林地对河流生态系统的影响直接延伸到了水中。复合林泽带可以进一步增强湖岸的稳固;树冠形成的阴影能够营造空气湿度变化小、相对湿度较高的局部微气候环境,为喜中温性的河岸无脊椎动物和温度敏感性鱼类提供更加适宜的生境^[16];在林泽内部进行林窗设计,在冬季高水位时期可以形成明水面,再加上出

露水面的林冠,从而能够为越冬水鸟提供良好的停栖地和庇护环境(图8)。

2.3.2 垂直结构设计

为保证库岸垂直梯度上的生态连通性,避免硬质铺垫,使垂向方向上的水文过程、生物过程等得以维持,在复合林泽带(170~175 m)和生态护坡带(175~180 m)构建“乔—灌—草”复层混交群落。其中,复合林泽带中的草本植物以自然恢复的狗牙根(*Cynodon dactylon*)、牛筋草(*Eleusine indica*)、合萌(*Aeschynomene indica*)等为主,除此之外,种植池杉、落羽杉等典型耐水淹乔木,并间插种植乌桕以提升湖岸景观的层次感和立体感,丰富消落带单调的草甸景观和季相变化(图9);林泽边缘(175~176 m)配植芭茅(*Miscanthus floridulus*)等高草草本形成“高草—林泽”复合系统,进一步增强复合林泽带实施区的生物生境功能;在海拔176~180 m处设计复合混交植被带,以柳树、杨树等本地乔木为主,形成“乔—灌—草”复层混交

7. 恢复后实景图
8. 复合林泽带中的林窗
9. “乔—灌—草”复层混交群落(复合林泽带)



群落，留有自然恢复的空间，尽可能在恢复后期让土壤种子库发挥作用，利于本地植物自然恢复。

4 结语

本文以重庆市开州区汉丰湖北岸乌杨坝段库岸生态修复为例，提出反季节水位变化下的库岸生态防护带设计模式——多带多功能缓冲系统。针对复杂的水文变化，多带多功能缓冲系统从地形塑造、多功能生境设计、适宜植物筛选及配置等方面进行了库岸生态防护带建设的有益探索，筛选出了耐冬季深水淹没、夏季洪水冲刷和高温干旱的优良工程物种，如乌桕、落羽杉、池杉等。6年来，多带多功能缓冲系统面对冬季深水淹没和夏季高温干旱交替的逆境，各类植物长势良好，群落类型显著增多，群落结构较为稳定，表现出良好的韧性和较好的生态服务功能。这与不同空间尺度和环境梯度上的生境类型增加和质量改善有关，同时也与修复后鸟类、昆虫、鱼类等各生物类群之间的协同共生密切相关。乌杨坝段多带多功能缓冲系统形成了蜿蜒多变、多景观层次、多生态序列的湖岸柔性空间，生境质量优良，生态服务功能持续优化，生物多样性得到显著提升。

相较于天然湖泊和河流消落带，水库消落带水位涨落幅度大，生态系统更加脆弱，再加上受人类活动影响较大，目前消落带的生态修复依旧是国际性难题，亟需科学指导和技术支撑。尤其是在复杂的水文胁迫、物种入侵、高强度人为干扰等多重影响下的消落带生物多样性的形成和维持机制以及在不同的空间尺度上多样化生境的设计，都需要进一步深入研究，以有效提升消落带生物多样性。📌

参考文献

[1] 雷亨顺. 库区移民与可持续性发展(三)——重庆库区最大淹没县——开县的隐患[J]. 中国三峡建设, 1999(06): 10-11.

[2] 袁兴中, 杜春兰, 袁嘉, 等. 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[J]. 国际城市规划, 2019, 34(03): 37-44.

[3] 吕明权, 吴胜军, 陈春娣, 等. 三峡消落带生态系统研究文献计量分析[J]. 生态学报, 2015, 35(11): 3504-3518.

[4] 李波, 袁兴中, 杜春兰, 等. 池杉在三峡水库消落带生态修复中的适应性[J]. 环境科学研究, 2015, 28(10): 1578-1585.

[5] 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(03): 76-89.

[6] 万成炎, 马沛明, 常剑波, 等. 三峡水库生态防护带建设的初步探讨[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(01): 9-11.

[7] 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(04): 1382-1391.

[8] 杨波, 齐实, 孙嘉, 等. 河岸植被缓冲带完整性及恢复措施——以北京市密云水库上游潮白河流域为例[J]. 水土保持通报, 2014, 34(04): 178-183.

[9] 杨雪, 王志勇, 迁安三里河滨水缓冲带雨水径流及污染物消减效果与设计优化[J]. 生态学报, 2019, 39(16): 6029-6039.

[10] 王琼, 范康飞, 范志平, 等. 河岸缓冲带对氮、磷、农药污染物的削减作用研究进展[J]. 生态学杂志, 2020, 39(02): 665-677.

[11] 赵鹏, 胡艳芳, 林峻宇. 不同河岸带修复策略对氮磷非点源污染的净化作用[J]. 中国环境科学, 2015, 35(07): 2160-2170.

[12] MANUWAL P D A. Breeding Bird Response to Riparian Buffer Width in Managed Pacific Northwest Douglas-fir Forests[J]. Ecological Applications, 2001, 11(3):840-853.

[13] 赵玲玲, 夏军, 许崇育, 等. 水文循环模拟中蒸发估算方法综述[J]. 地理学报, 2013, 68(01): 127-136.

[14] 胡小贞, 许秋瑾, 蒋丽佳, 等. 湖泊缓冲带范围划定的初步研究——以太湖为例[J]. 湖泊科学, 2011, 23(05): 719-724.

[15] 叶春, 李春华, 邓婷婷. 湖泊缓冲带功能、建设与管理[J]. 环境科学研究, 2013, 26(12): 1283-1289.

[16] ALLEN D C, PETERS D P C. Microclimate Modification by Riparian Vegetation Affects the Structure and Resource Limitation of Arthropod Communities[J]. Ecosphere, 2016, 7(2): 1200.