基于“微地形—植物”协同的三峡库区城市消落带修复设计与评估*

杨柳青[1,2,3] 陈鸿飞[1,2,4] 游奉溢[5] 钱深华[4] 袁 嘉[1,2,4]

1 重庆大学建筑城规学院 重庆 400044
2 重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室 重庆 400044
3 黄河勘测规划设计研究院有限公司 郑州 450000
4 重庆大学三峡库区消落区生态修复与治理研究中心 重庆 400044
5 朴草（重庆）生态环境科技有限公司 重庆 400000

摘要：微地形与植物的协同作用是自然河岸带生态系统维持结构稳定与生物多样性的重要机制。三峡库区蓄水后，其沿岸城市的原有河岸带转变为周期性淹没且水位落差极大的消落带，内部地形与植被破坏严重，生物多样性快速衰退，对库区城市的生态安全造成负面影响。选取重庆市开州区汉丰湖北岸的乌杨坝消落带，首次基于“微地形—植物”协同提出消落带生态系统修复设计技术框架，并对修复后的消落带微地形、植物群落和鸟类群落进行调查分析，评估修复设计的实际效果。结果表明：丰富的微地形类型及其组合有效促进了乌杨坝消落带的植物多样性恢复；二者耦合作用，在不同水位条件下维持了鸟类生境异质性，使鸟类多样性得到提升。因此，“微地形—植物”协同设计有助于维持三峡水库消落带生态系统的结构稳定性及生物多样性，有利于生态服务功能的保障及发挥。

关键词：消落带；微地形；植物群落；生境修复；三峡库区
DOI：10.12169/zgcsly.2023.02.02.0001

Urban Drawdown Zone Restoration in the Three Gorges Reservoir Area Based on “Microtopography-Plant” Synergy: Design and Evaluation

Yang Liuqing[1,2,3] Chen Hongfei[1,2,4] You Fengyi[5] Qian Shenhua[4] Yuan Jia[1,2,4]

(1. School of Architecture and Urban Planning, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China; 4. Research Center for Ecological Restoration and Governance of Water Level Fluctuation Zone in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 5. Pucao (Chongqing) Ecological Environment Technology Co., Ltd., Chongqing 400000, China)

Abstract: The synergistic effect of microtopography and vegetation is a vital mechanism for the ecosystems in natural riparian zones to maintain structural stability and biodiversity. After the impoundment of the Three Gorges Reservoir (TGR), the original urban riparian zone is transformed into the drawdown zone characterized with associated periodic inundation and extreme water level drop, in which the topography

收稿日期：2023-02-02
* 基金项目：国家自然科学基金青年科学基金项目（51808065）；国家自然科学基金青年科学基金项目（31901152）
第一作者：杨柳青（1998-），女，硕士生，研究方向为湿地景观修复。E-mail：898954603@qq.com
通信作者：袁嘉（1988-），男，博士，副教授、博士生导师，研究方向为生态景观规划与修复设计。E-mail：jyuan523@vip.163.com

and vegetation suffer severe damage, resulting in rapid biodiversity decline and great threat to the ecological security of cities in the TGR area. Selecting Wuyangba drawdown zone on the north shore of Hanfeng Lake in Kaizhou District of Chongqing as an example, this paper proposes a technical framework for the drawdown zone ecosystem restoration design based on the synergy of microtopography and vegetation for the first time, investigates the microtopography, plant communities and bird communities in the restored drawdown zone and assesses the performaces of the restoration design. The results show that the rich microtopography and its combinations effectively promote plant diversity in the Wuyangba drawdown zone, while the coupling between microtopography and vegetation helps maintain the bird habitat heterography at different water levels, which greatly enhances the bird diversity. The synergy of "microtopography-vegetation" design is conducive to maintaining the structural stability and biodiversity of the drawdown zone ecosystem in the Three Gorges Reservoir area, facilitating the assurance and enhancement of its ecological services.

Keywords: drawdown zone; microtopography; plant community; habitat restoration; the Three Gorges Reservoir area

三峡水库自 2010 年完成高水位蓄水以来，采用“蓄清排浑”的运行方式，导致库区城市沿江区域在海拔 145~175 m 处形成季节性水位落差达 30 m、冬季淹没 5~6 个月的消落带。三峡库区城市消落带作为受复杂水文胁迫的生态脆弱区域，面临植被与生境质量衰退以及生物多样性下降等严峻挑战[1-3]。目前，有关修复研究主要集中于三峡库区城市消落带的土壤污染防治[4]、适生植物筛选[5-6]、植物如何响应冬季深水淹没等方面[7]；这些研究虽然为消落带的土壤及植被修复提供了一些基础科学依据，但缺乏针对消落带生态系统结构的深入机理研究和修复实践，修复设计技术较为单一且发展滞后。

在自然河岸带中，微地形与植物是最为关键的两类生态要素，二者协同作用为河岸带生境异质性与生命景观的形成提供基础条件[8]。其中，微地形通过改变水热组合条件与土壤性质影响河岸带植物的生长发育[9-10]，并为不同植物物种的共存提供条件。例如，小丘和土垄等凸起地形通常比洼地、沟槽等下凹地形具有更好的光照与排水条件，适合喜光、耐旱植物生长[11]；更加阴湿的凹地形和其中积水导致的土壤缺氧与酸化条件更适宜喜阴耐湿、耐缺氧和酸性环境的植物生长[12]。植物会根据微地形上不同位置的水热条件选择适宜生长点，植物种子借助风力、水流在微地形的不同位置扩散或沉积[13]，这些原因促使植物空间分布对微地形产生响应，并生成多样化的小尺度空间聚集格局，对河岸带植物群落的结构多样性形成具有重要作用。此外，植物为微观尺度上的地形要素[14-15]，与河岸带微地形耦合形成异质性环境空间，为鱼类、两栖类、鸟类等动物提供多样化的生境，构成了河岸带生物多样性赋存的重要基础[16-18]。

由于复杂水位变化以及过往不合理开发利用的影响，三峡库区城市消落带内原有“微地形—植物”协同遭受破坏，导致消落带生态系统严重退化。然而，当前鲜有立足“微地形—植物”协同开展的消落带生态修复研究及实践，相关设计技术严重匮乏。本文选取位于三峡库区腹心地带的重庆市开州区汉丰湖北岸乌杨坝段消落带，提出基于“微地形—植物”协同的消落带修复设计技术框架，并于 2013—2014 年完成修复实践。2022 年，对修复后乌杨坝消落带的微地形、植物群落与鸟类群落展开调查，分析评估生态修复的实际效果。研究成果可为大型水库消落带的生态治理，以及库区沿岸城市的生物多样性保护、生态安全与可持续发展提供科学依据和可参考的技术范式。

1 乌杨坝消落带概况

汉丰湖作为三峡库区蓄水及乌杨坝水位调节坝双重影响下产生的城市内湖（图 1A），具有典型双重水位变化，即 10 月至翌年 1 月三峡水库高水位运行时，汉丰湖水位维持在 175 m；夏季三峡水库水位消落到 145 m 时，乌杨坝水位调节坝下闸蓄水，使汉丰湖水位保持在

170.28 m（图 1B）。汉丰湖北岸的乌杨坝段消落带长约 1 882 m，平均宽度约 200 m，其中，173～175 m 高程为原有防洪硬质水泥护坡及水泥格框护坡（坡度约 40°）；173 m 高程以下则是以土壤、卵石和细砂为主要底质的岸坡（坡度<30°）（图 1C）。

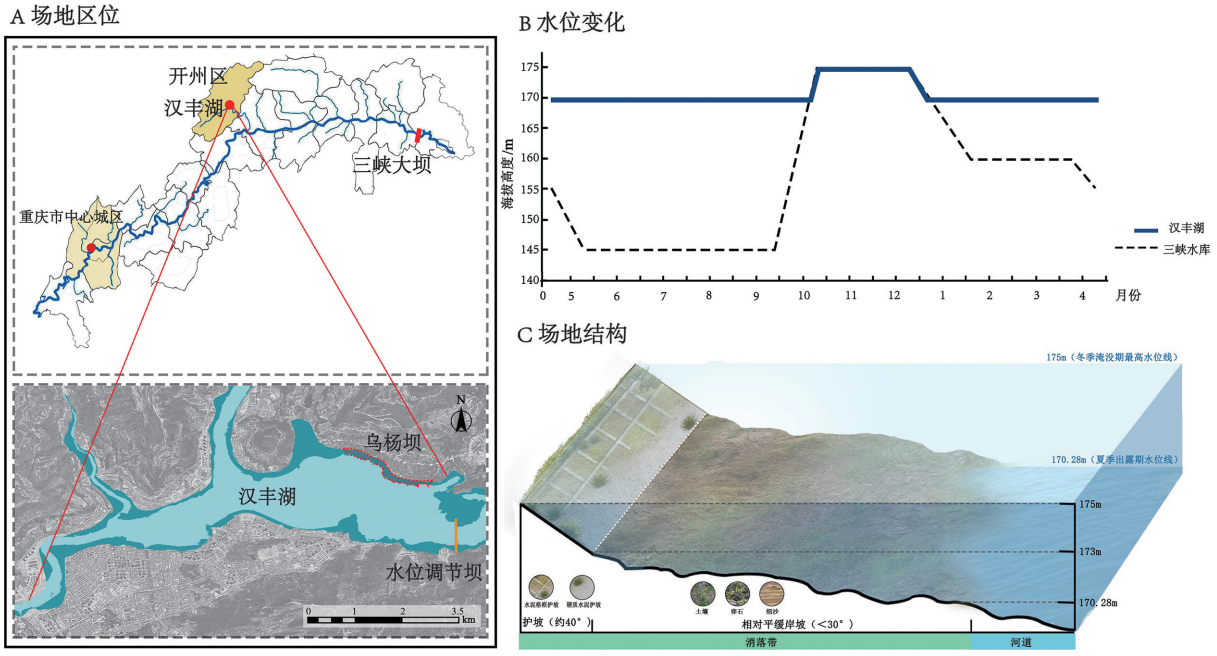


图 1　汉丰湖乌杨坝消落带区位、结构及水位变化示意图

乌杨坝消落带存在以下突出问题：1）地形破坏。淹没期的泥沙淤积、出露期的作物耕种以及硬质护坡建造等影响，导致乌杨坝消落带173 m高程以下区域产生趋于平整和均质化的地形；采石挖沙和水位变化造成的侵蚀，则造成了局部地形的破碎化（图 2）。地形破坏导致消落带坡面结构脆弱失稳，植物定居生长困难，缺乏多物种共存所需的环境空间异质性。2）植被退化。长达 4～5 个月的冬季深水淹没对植物生长造成严重胁迫，导致场地内原有植物大量死亡淘汰，形成以狗牙根（*Lycium chincnse*）、苍耳（*Xanthium strumarium*）等一年生杂草占绝对优势（二者相对盖度接近 90%）、结构与外观极为单一的植物群落。植被退化加剧了消落带水土流失，也更易产生冲刷和淤积等问题。3）生物生境衰退。水位变化、地形受损和植被退化对乌杨坝消落带生物生境维持造成负面影响。以鸟类为例，冬季乌杨坝消落带淹没在水下，仅能为极少量游禽提供基本生境；夏季出露期具有的单一次生草本植被难以满足鸟类栖息、觅食、繁殖等多样化的生境需求。

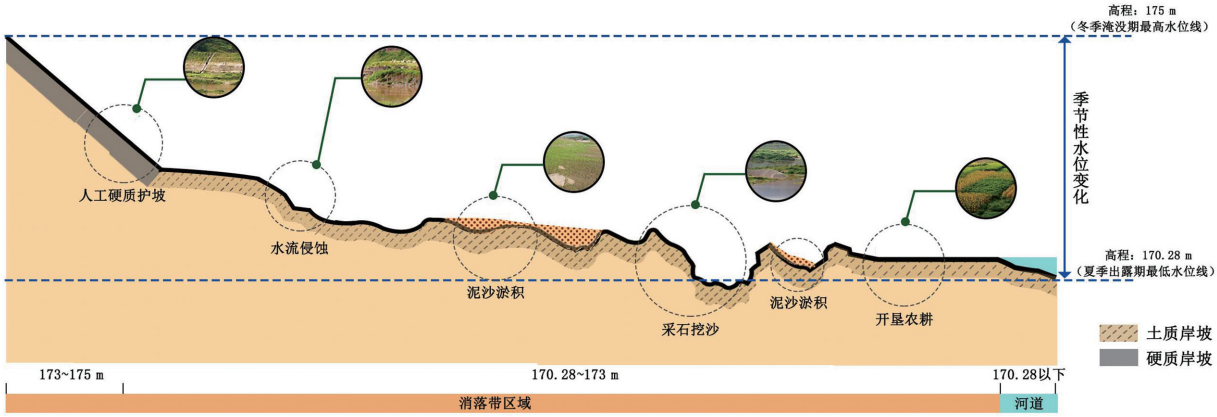


图 2　修复前乌杨坝消落带地形状况示意图

2 乌杨坝消落带“微地形—植物”协同修复设计

针对上述乌杨坝消落带的环境挑战，立足“微地形—植物”协同作用提出修复设计策略：1）适应多重水位变化，优化微地形与植物群落多样性的韧性缓冲带设计；2）提出以提升消落带生境异质性为目的的林泽带“微地形—植物”复合系统设计。设计策略顺应乌杨坝消落带的海拔高程与季节性水位变化，协调互补、有机耦合，组织起有效的消落带生态系统修复设计技术框架（图 3）。

2.1 韧性缓冲带设计

根据乌杨坝高程空间梯度，自 173 m 高程向汉丰湖水体方向，分别设置线性凹道带、台地林泽带与多空隙护岸带（图 4）。在分层缓冲带中，设置了具有不同功能的地形类型，并针对消落带水位变化配置适生植物群落，实现整体地形修复与植物群落配置的空间耦合。

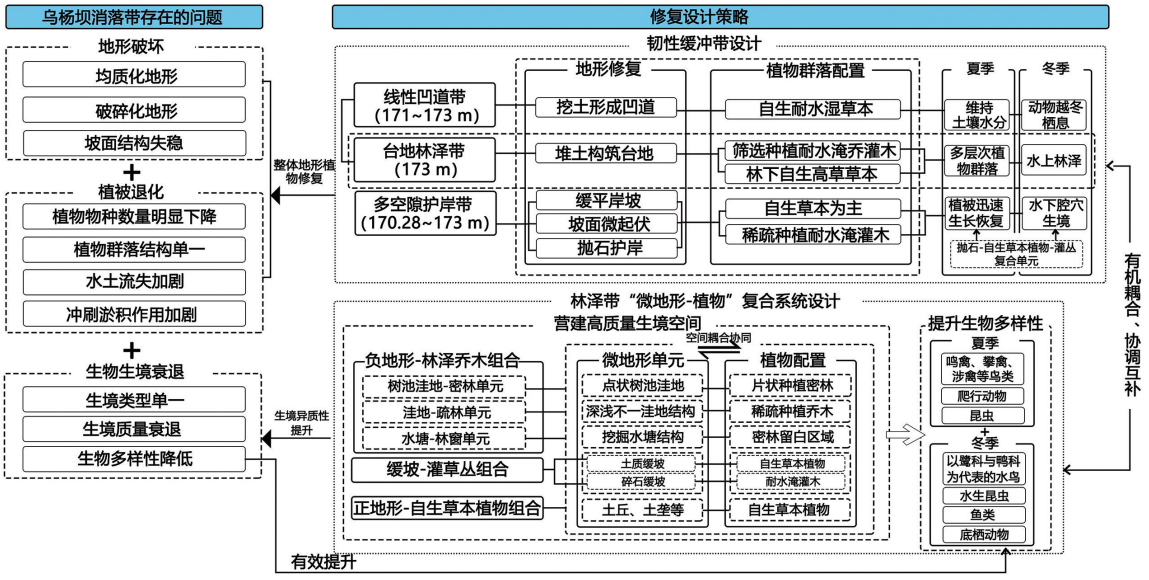


图 3 乌杨坝消落带“微地形—植物”协同修复设计技术框架

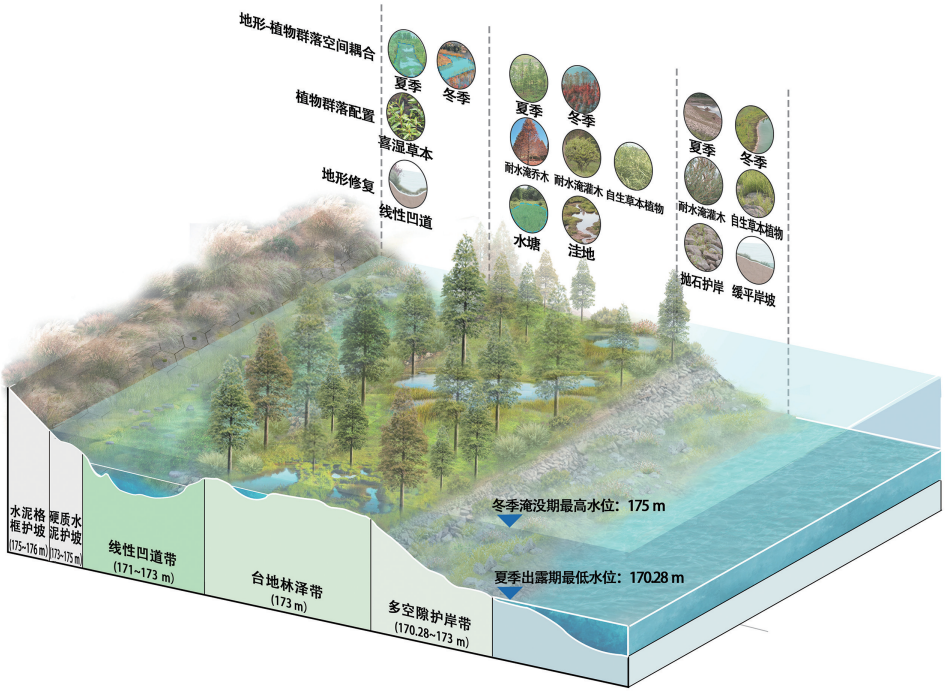


图 4 韧性缓冲带地形结构及植物群落配置

2.1.1　线性凹道带与台地林泽带

在 173 m 高程区域，设计并人工挖掘宽度5 m 的线性凹道。利用挖掘凹道所取出的土壤和砂石，在迎水一侧铺设带状台地并种植落羽杉（*Taxodium distichum*）、池杉（*Taxodium distichum* var. *imbricarium*）、乌桕（*Triadica sebifera*）等耐水淹乔木形成林泽带。借助抬高的带状台地地形，使林泽乔木的部分树冠在冬季淹没期出露于水面之上，保障乔木在冬季淹没期的光合作用和存活率。

2.1.2　多空隙护岸带

高程 170.28～173 m 作为消落带前缘，是水位变化干扰最为严重的区域。本研究将该区域设计为坡率 1∶3 的缓平岸坡，在保持坡面微地形起伏的基础上，布置抛石并保证抛石之间具有 20 cm 左右的空隙。抛石护岸能够有效缓冲水流冲击，维持岸坡结构稳定；抛石间空隙提供了植物生长空间，并与抛石一起组成拦截河流沉积物、营养物质与植物繁殖体的微地形。多空隙抛石护岸植被以随水流传播的酸模叶蓼（*Persicaria lapathifolia*）等自生草本植物为主，并稀疏种植秋华柳（*Salix variegata*）等耐水淹灌木。

2.2　林泽带“微地形—植物”复合系统设计

在沿乌杨坝海拔高程梯度设置的韧性缓冲带中，台地林泽带不仅具有重要的水流缓冲功能，也是夏季鸟类筑巢、繁殖以及冬季鱼类栖息越冬和水鸟觅食停歇的重要生境。因此，需要结合野生动物的生境需求，进一步加强林泽带“微地形—植物”协同设计，营建高质量消落带生境空间（图 5）。通过置入洼地、浅塘、缓坡、土丘、土垄等微地形结构，并调整优化各类微地形单元与植物配置的空间组合模式，促进林泽带台地的“微地形—植物”复合系统形成与有效运行。

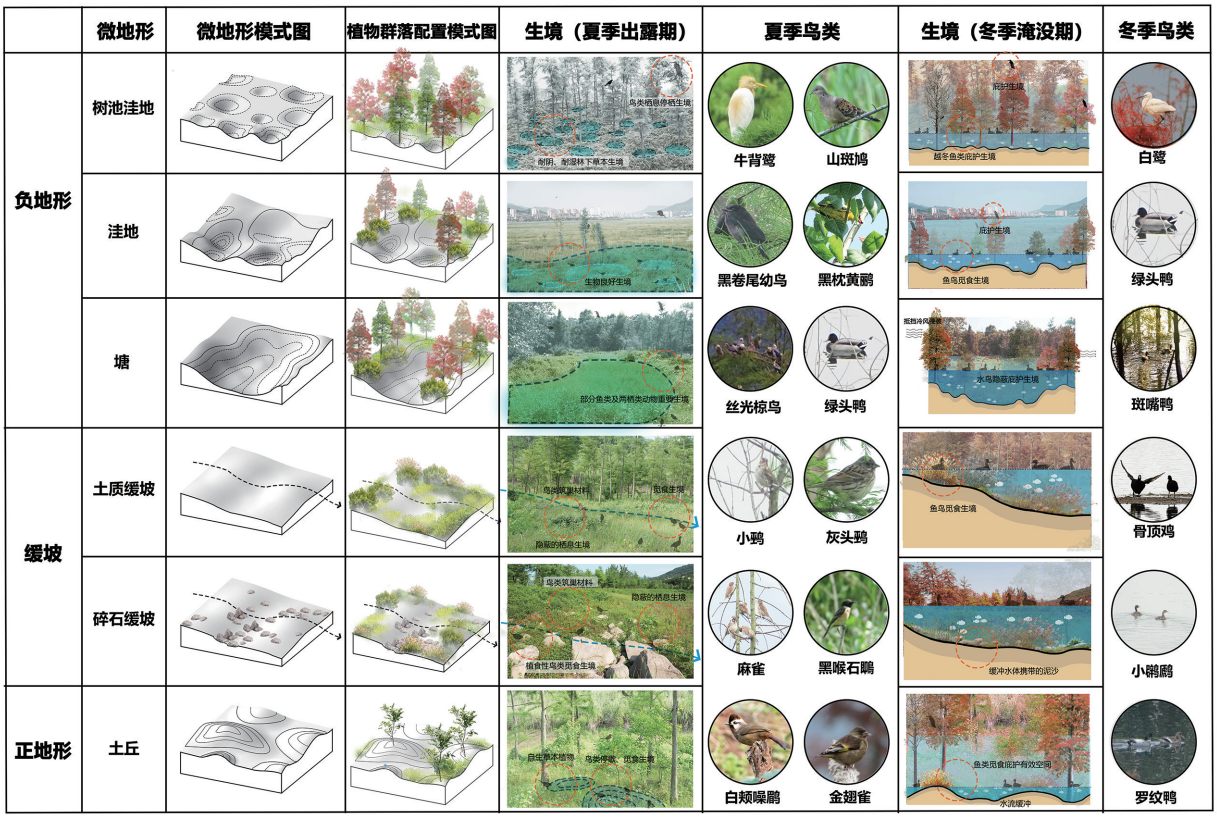


图 5　林泽带“微地形—植物”复合系统设计及鸟类种群分布

2.2.1　负地形—林泽乔木组合

1）树池洼地—密林单元。在以落羽杉为优势种的片状种植密林中，围绕乔木树干基部挖出直径 50～100 cm、深度 10～25 cm 的树池洼地，形成树池洼地—密林单元。树池洼地能够在夏季出露期为密林乔木储存生长所需水分，是耐荫、耐湿林下草本的良好生长环境，也是冬季淹没期越冬鱼类重要的庇护生境。

2）洼地—疏林单元。在台地中设置面积 5～15 m^2，深浅不一的洼地结构，围绕洼地边缘稀疏

种植耐水淹乔木形成洼地—疏林单元。夏季出露期，疏林洼地的良好光照及积水条件，使之成为湿生植物生长和水生昆虫、两栖类动物、水鸟的良好生境。冬季淹没期，洼地—疏林单元能为鱼类提供觅食、栖息生境。

3）水塘—林窗单元。在密林种植过程中，保留一定的空白区域，形成林窗；在林窗内部挖掘深度 0.6~1.5 m 的水塘，形成水塘—林窗单元。水塘能够在夏季出露期维持积水环境，是重要的雨水调蓄单元，也是部分鱼类与两栖类动物的重要生境。

2.2.2 缓坡—灌草丛组合

在负地形—林泽乔木组合的边缘空间，设置土质缓坡与碎石缓坡。其中，土质缓坡具有丰富的水湿梯度变化，为自生草本植物提供良好的生长环境。以卵石、砾石构建的碎石缓坡，与秋华柳等耐水淹灌木相结合，既能在夏季维持林泽内部洼地、水塘等负地形的基本形态，又能在冬季有效缓冲、拦截水体携带的泥沙，防止淤积对负地形造成的破坏。

2.2.3 正地形—自生草本植物组合

在台地林泽带置入少量土丘、土垄等正地形结构。在夏季，正地形阳面能够更好地接收光照，为喜阳和需求良好排水环境的自生草本植物提供生长空间。在冬季，淹没于水下的正地形与草本植物形成鱼类觅食与庇护的有效空间，并具有一定的水流缓冲功能。

3 乌杨坝消落带修复效果评估

3.1 调查方法

2022 年 7 月，对修复后乌杨坝消落带的微地形、植物群落及鸟类群落展开定性及定量调查。在河流垂直方向设置 6 条平行植物样线，每条样线间隔 500 m。在每条样线中沿海拔高程梯度设置采样点（170.28、171、172、173、175 m），每个采样点内随机设置 4 个 1 m×1 m 样方，记录样方内的植物物种、多度、高度、盖度。在 173 m 高程的台地林泽带样方中，结合全站仪、软尺测量微地形的高度（深度）、坡度等数据。沿河流方向设置 2 条平行鸟类样线，选择晴朗且温度适宜的天气，在鸟类较为活跃的时间（日出后和日落前 3 h 内）以 1.5~2.0 km·h^{-1}的速度沿样线行进，对样线两侧鸟类进行观测，详细记录各类“微地形—植物”协同生境中的鸟类行为活动及其与生境的相关关系。为更加全面了解乌杨坝消落带的鸟类组成，在秋季和冬季补充鸟类观测记录。

根据相关文献，采用公式计算修复后乌杨坝消落带的植物群落多样性指标，包括 Shannon-Wiener 多样性指数、Patrick 丰富度指数和 Berger-Parker 优势度指数。通过计算样方内的地形标准差，反映消落带的微地形复杂度[19-20]，计算公式为：

$$HF_\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(H_i - \overline{H})^2} \quad (1)$$

式（1）中：HF_σ 为样方内的地形标准差；N 为样方内均匀分布的高程点个数；Hi 为各高程点的相对高程值；$\overline{H}$ 为地形样方内的相对高程平均值。其中，HF_σ 的值越大，说明高程波动的范围越大，即微地形的起伏复杂程度越大。最后，在 SPSS 26.0 软件中，采用斯皮尔曼相关性分析（Spearman Correlation Analysis）检验植物群落多样性与微地形复杂度的相关性。

3.2 修复效果

3.2.1 消落带结构稳定性显著增强

调查结果表明，乌杨坝消落带原本的受损地形，已修复为由凹道、台地、多空隙护岸等沿高程梯度分布的地形及其由洼地、水塘、缓坡、土丘等微地形组合而成的多元地形镶嵌体，具有极为丰富的环境空间异质性。修复后的消落带地形提供了不同植物物种共存所需的多样化空间生态位，并与拟自然配置的乔木林泽、灌草丛以及自生草本植物协同作用，形成“微地形—植物”复合系统，在不同高程及水文时期发挥缓冲、拦截、净化等重要生态功能。自建立以来，“微地形—植物”复合系统历经近 10 年季节性水位变动和冬季深水淹没考验，植被发育良好，水土流失大幅减少，消落带整体结构稳定性得到显著提升（图 6）。

3.2.2 消落带植物多样性显著提升

采用“微地形—植物”协同设计修复的乌杨坝消落带，建立了以落羽杉、池杉、乌桕为优势种的乔木林泽，以及以秋华柳为主要优势种的耐



图 6　不同水文时期的乌杨坝消落带结构对比

水淹灌丛，极大地丰富了乌杨坝消落带的植物物种组成，形成了外观优美、季相丰富且兼具缓冲水流、遮荫挡风、提供生物生境的复层植物群落。修复后的乌杨坝消落带内共计发现维管植物 87 种，周边未修复消落带区域仅有 45 种草本自生植物，且以狗牙根、苍耳占据绝对优势地位；修复后的消落带形成以艾（*Artemisia argyi*）、野艾蒿（*Artemisia lavandulifolia*）等菊科草本植物，狗尾草（*Setaria viridis*）等禾本科草本植物以及草木樨（*Melilotus suaveolens*）等豆科草本植物为主要优势种（分别占草本植物总数的 15. 17%、11. 33% 和 7. 59%）的草本植物群落，极大地增加了物种组成和群落结构的丰富度。

采用斯皮尔曼相关性分析检验植物群落多样性与微地形复杂度的相关性（图 7）表明，修复后台地林泽带（173 m 高程）内的地形复杂度与 Shannon-Wiener 多样性指数、Patrick 丰富度指数和 Berger-Parker 优势度指数等 3 项植物多样性指数均具有显著正相关关系（$P<0.05$），充分显示了研究营建的微地形类型及其空间组合对消落带植物多样性的重要促进作用。微地形与植物多样性之间的耦合协同，成为乌杨坝消落带适应水位变化影响、维持生态系统结构并不断优化功能的重要基础。

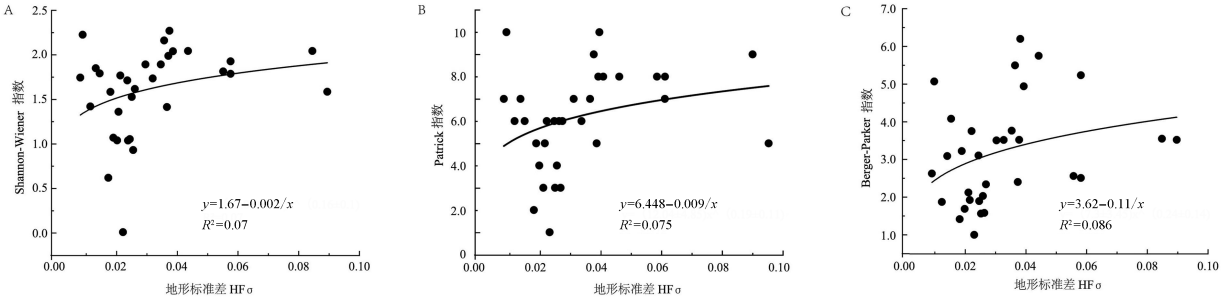


图 7　微地形复杂度与植物多样性指数相关性分析

3. 2. 3　消落带生物多样性持续优化

乌杨坝消落带修复区域内共调查记录近 130 种鸟类，其中包括国家Ⅰ级保护野生鸟类 2 种，国家Ⅱ级保护野生鸟类 7 种（表 1）；周边未修复消落带区域仅发现 74 种鸟类。这说明修复后乌杨坝消落带鸟类种类显著增加，种群数量也逐渐恢复。显著的“地形—植物”协同作用共同促进了乌杨坝鸟类生境的持续优化。夏季，出露的线性凹道能够充分保持土壤湿度并形成雨水调蓄空间，维持林泽乔木及自生植物生长所需的土壤水分。冬季，淹没在水下的线性凹道成为绿头鸭（*Anas platyrhynchos*）、小䴙䴘（*Tachybaptus ruficollis*）等游禽、鱼类和水生无脊椎动物栖息、越冬的良好场所；带状台地上的乔木林泽能够有效缓冲水流和冷风，为凹道内的游禽和鱼类提供更为隐蔽舒适的越冬环境；出露于水面之上的林泽树冠，则成为白鹭（*Egretta garzetta*）、普通鸬鹚（*Phalacrocorax carbo*）等水鸟和部分林鸟的停歇、夜栖、庇护生境。此外，在 170. 28 ~ 173 m 高程的消落带前缘，多空隙的抛石护岸与植物协同形成了“抛石—自生草本植物—灌丛”复合单元，大幅提升了消落带前缘的空间异质性，既能有效

提升水流缓冲能力，又在冬季淹没期形成丰富的水下腔穴，成为越冬鱼类和虾蟹觅食及庇护的良好生境，进而保障了越冬水鸟的食物来源。

在台地林泽带内设计营建的各类“微地形—植物”复合系统，形成了多样化的鸟类生境类型。负地形—林泽乔木组合在夏季出露期提供了不同负地形结构交混嵌套而成的小微湿地镶嵌体，一方面与林泽遮荫共同形成具有较高湿度与较低温度的局部微气候，有利于消落带鸟类的生存繁衍；另一方面，这些浅水环境下喜湿草本植物丰富，成为水生昆虫和两栖类动物的生境，进而成为以鹭科鸟类为代表的涉禽的良好觅食场所。在冬季，负地形—林泽乔木组合形成极为丰富的“水上—水下”一体化生境，交混嵌套的负地形结构能够在淹没期富集水体内的营养物质，是底栖动物生长、越冬鱼类觅食与庇护的重要生境，为喜食水下植物、水生昆虫和鱼类，以及水鸟提供最佳冬季觅食生境。因此，冬季淹没期的乌杨坝已成为三峡库区的重要水鸟越冬地，包括罗纹鸭（*Mareca falcata*）、斑嘴鸭（*Anas zonorhyncha*）等，以及中华秋沙鸭、花脸鸭等国家重点保护野生动物（表 1）。此外，缓坡—灌草丛组合内植物的果实和其中栖息的昆虫，不仅为金翅雀（*Chloris sinica*）、麻雀（*Passer montanus*）等小型草丛鸟提供充足食物，也能为小型林鸟和灌丛鸟提供筑巢材料和隐蔽的栖息生境。正地形及其中自然萌发的自生草本植物，则是白颊噪鹛（*Garrulax sannio*）、白头鹎（*Pycnonotus sinensis*）等鸟类停歇和觅食的良好生境。

表 1 修复后乌杨坝消落带内的国家重点保护野生动物（鸟类）名录

国家Ⅰ级保护野生动物（鸟类）	国家Ⅱ级保护野生动物（鸟类）
中华秋沙鸭（*Mergus squamatus*）	鹗（*Pandion haliaetus*）
黄胸鹀（*Emberiza aureola*）	普通鵟（*Buteo japonicus*）
	斑头秋沙鸭（*Mergellus albellus*）
	花脸鸭（*Sibirionetta formosa*）
	鸳鸯（*Aix galericulata*）
	黑颈鹛鹛（*Podiceps nigricollis*）

4 结语

本研究针对复杂水位变化对三峡库区城市消落带造成的严峻挑战，首次立足“微地形—植物”协同开展消落带生态修复的实证性研究。结果表明，修复后的乌杨坝消落带结构稳定性显著增强，物种多样性及植物群落结构持续优化，鸟类种类及种群数量显著提升。“微地形—植物”协同修复设计技术顺应三峡库区城市山地环境下的消落带复杂高程变化及水文情势，相较以往局限于单一要素的修复实践，具有系统性强、可持续性佳的突出优势。该项技术在汉丰湖沿岸的其他消落带区域得到良好推广，使汉丰湖整体生态系统结构、生物多样性与景观观赏效果持续优化，成为深受市民和游客喜爱的国家湿地公园与国家级旅游景区。研究成果对三峡库区及其他大型水库消落带的生态系统修复，以及库区沿岸城市的生物多样性保护、生态安全与可持续发展具有积极参考价值。

在今后的研究与实践中，需要进一步研究地形与植物群落的相互影响、作用机制，及其对消落带生物多样性的维持作用机理。基于科学定量研究，结合消落带植物群落演变规律，探讨影响“微地形—植物”协同作用的关键调控因子。在推广消落带“微地形—植物”协同修复设计技术的同时，总结微地形类型、形态、深度、面积比以及植物物种组成与数量比等关键技术参数，从而完善消落带生态系统修复的科学设计。

参考文献

[1]郑海金，杨洁，谢颂华.我国水库消落带研究概况[J].中国水土保持，2010(6)：26-29.

[2]YUAN X Z，ZHANG Y W，LIU H，et al.The littoral zone in the Three Gorges Reservoir，China：challenges andopportunities[J].Environmental Science and Pollution Research International，2013，20(10)：7092-7102.

[3]肖凤娟.遵循过程的汉丰湖消落带湿地景观设计[D].重庆：重庆大学，2013.

[4]PEI S X，JIAN Z J，GUO Q S，et al.Temporal and spatial variation

and risk assessment of soil heavy metal concentrations for water-level-fluctuating zones of the Three Gorges Reservoir[J].Journal of Soils and Sediments,2018,18(9):2924-2934.

[5]袁兴中.三峡库区澎溪河消落带生态系统修复实践探索[J].长江科学院院报,2022,39(1):n1-9.

[6]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(3):37-44.

[7]刘明辉,谢婷婷,李瑞,等.三峡库区消落带池杉-土壤碳氮磷生态化学计量特征[J].生态学报,2020,40(9):3072-3084.

[8]SINGH R,TIWARI A K,SINGH G S.Managing riparian zones for river health improvement: an integratedapproach[J].Landscape and Ecological Engineering,2021,17(2):195-223.

[9]BENDIX J, HUPP C R. Hydrological and geomorphological impacts on riparian plantcommunities[J].Hydrological Processes, 2000,14(16/17):2977-2990.

[10]EVERSON D A, BOUCHER D H. Tree species-richness and topographic complexity along the riparian edge of the Potomac River[J].Forest Ecology and Management,1998,109(1/2/3): 305-314.

[11]DIAMOND J S,EPSTEIN J M,COHEN M J,et al.A little relief: Ecological functions and autogenesis of wetland microtopography[J]. WIREs Water,2021,8(1):e1493.

[12]BRULAND G L, RICHARDSON C J. Hydrologic, edaphic, and vegetative responses tomicrotopographic reestablishment in a restored wetland[J]. Restoration Ecology, 2005, 13(3): 515-523.

[13]PALMER M A,ZEDLERJ B,FALK D A.Foundations of restoration ecology[M].Washington DC: Island Press/Center for Resource Economics,2016

[14]CORENBLIT D,BAAS A C W,BORNETTE G,et al.Feedbacks between geomorphology and biota controlling Earth surface processes and landforms: A review of foundation concepts and current understandings[J]. Earth-Science Reviews, 2011, 106(3/4):307-331.

[15]CORENBLIT D, TABACCHI E, STEIGER J, et al. Reciprocal interactions and adjustments between fluvial landforms and vegetation dynamics inriver corridors: A review of complementary approaches[J].Earth-Science Reviews,2007,84(1/2):56-86.

[16]张建春,彭补拙.河岸带研究及其退化生态系统的恢复与重建[J].生态学报,2003,23(1):56-63.

[17]王庆锁,王襄平,罗菊春,等.生态交错带与生物多样性[J].生物多样性,1997,5(2):126-131.

[18]MCKOWN J G,MOORE G E,PAYNE A R,et al.Successional dynamics of a 35 year old freshwater mitigation wetland in southeastern New Hampshire[J]. PLoS One, 2021, 16(5): e0251748.

[19]乔森.基于高差与标准差法的中国地形起伏度研究[J].绿色科技,2020,22(6):31-33.

[20]ROSE J P, MALANSON G P. Microtopographic heterogeneity constrains alpine plant diversity,Glacier National Park,MT[J]. Plant Ecology,2012,213(6):955-965.