

长江库岸消落带植被群落自然恢复特征研究

秦泽华¹ 黄万福²

1. 重庆市地质矿产勘查开发集团国际矿业有限公司 重庆 400000

2. 重庆一三六地质队 重庆 400000

摘要：长江库岸消落带作为水陆生态交错敏感区，面临水文节律剧变、土壤侵蚀加剧与人为干扰叠加导致的生态退化问题。本研究针对植被恢复中存在的生态退化机制复杂、物种结构单一及水位波动制约等核心问题，提出分区修复、乡土物种筛选与水位适应机制构建等自然恢复优化策略。融合地理空间分析与生态模型，设计乔灌草复合群落配置方案，强化植被抗逆性与水土保持功能。研究结果可为库岸带生态修复提供理论支撑与技术路径，推动退化生态系统结构与功能协同恢复，助力区域生态安全格局优化，相关成果已在重庆市忠县复兴镇岸线生态修复等多个库岸修复项目中得到应用。

关键词：长江库岸消落带；植被自然恢复；生态退化；乡土物种；复兴镇岸线修复

引言：自然修复技术基于恢复生态学基本原理（如生态位原理、生物多样性理论、生态适应性理论），以自然生态系统的结构和演替机制为参照，强调生态系统自我恢复与调节能力，最小化人为干预，以乡土植物为主体，促进植被向演替后期群落恢复，最终实现生态系统良性循环。生态自然修复是国家生态修复政策的重要方向之一。

1 库岸消落带生态背景

2020年《山水林田湖草生态保护修复工程指南（试行）》提出“坚持节约优先、保护优先、自然恢复为主的方针”，并强调“遵循自然生态系统的整体性、系统性、动态性及其内在规律”。2022年《矿山生态修复技术规范》（TD/T 1070—2022）及2023年《重庆市矿山生态修复项目设计技术要求（试行）》（YGZB 01-2023）均倡导“尊重生态系统演替规律，自然恢复与人工修复相结合，人工修复为自然恢复创造条件，最大限度发挥自然修复能力，避免过度工程治理”。

长江库岸消落带作为水陆交错的敏感生态界面，具有独特的地形梯度与水文节律特征。库区周期性水位涨落形成垂直高差显著的带状区域。土壤基质受沉积-侵蚀交替作用呈现层状分异：下部淤积层黏粒含量高、透水性差；上部侵蚀区粗骨化现象普遍。消落带承担着截留面源污染物、缓冲波浪侵蚀、维持滨岸生物多样性等核心生态功能，其植被群落的根系固土与凋落物输入对调节碳氮循环至关重要。水文驱动下的淹水-干旱交替环境塑造了特殊适生植物类群，湿生与旱生植物沿高程梯度形成替代分布格局。人类活动干扰加剧了其生态脆弱性：农业垦殖遗留的耕作层扰动加速土壤结构退化；采

砂作业改变河床形态，诱发岸线崩塌；船舶航行产生的次生波浪加剧近岸带侵蚀。库区蓄水调度打破自然水文节律，导致原有河岸带连续植被廊道破碎化，物种迁移与基因交流受阻，生态系统稳定性面临严峻挑战。

2 植被恢复现存问题

2.1 生态退化机制复杂

长江库岸消落带生态退化呈现多因子交互作用特征，水文节律剧变、土壤侵蚀加剧与人为干扰叠加导致生态系统自愈能力丧失。周期性淹水破坏土壤结构，黏粒与有机质随径流迁移，表层土壤沙化趋势显著，部分区域形成贫瘠化基质，限制植物根系定植与养分吸收。强降雨条件下坡面径流冲刷诱发沟蚀与崩塌，侵蚀沟发育密度增加，微地形破碎化割裂植被连续分布格局。人类活动干扰加剧生境异质性：农业垦殖遗留耕作层扰动土壤原生结构；采砂作业改变岸线形态；船舶航行产生的波浪侵蚀削弱近岸带植被固土能力。不同退化驱动因子形成正反馈循环（如土壤持水能力下降加剧干旱胁迫，植被覆盖减少放大侵蚀风险），使生态系统陷入逆向演替困境^[1]。

2.2 物种结构单一突出

消落带植被群落趋向单一化，部分区域形成人工林或入侵物种主导的简单群落。耐淹速生树种的过度推广导致乡土物种种质资源流失，群落垂直结构简化（乔木层与草本层间缺乏灌木过渡带），冠层郁闭度不足加剧地表蒸发。单一物种连续种植引发化感物质累积，抑制伴生植物种子萌发与幼苗生长，并降低土壤微生物多样性，影响养分循环效率。入侵植物（如紫茎泽兰）凭借强繁殖力占据生态位，挤占本土物种生存空间，形成单

优种群落。种子传播媒介缺失与动物取食偏好改变，导致植物群落更新受阻，林下植被稀疏区域地表裸露面积扩大，生态系统服务功能衰退。

2.3 水位波动制约显著

水库调度引发的水位剧烈波动打破原有植被适应节律，淹水时长与干旱强度常超出多数物种生理耐受阈值。消落带下部区域长期淹水导致根系缺氧，土壤还原性物质积累毒害植物根系；湿生植物在退水期易遭遇脱水胁迫，出现叶片萎蔫与光合机构损伤。中高程区域水位骤降引发土壤水分急剧流失，毛管水断裂导致深层根系吸水受阻，增加乔木木质部栓塞风险。水位变化速率与植被恢复周期错位，幼苗定植阶段遭遇非预期淹水，定居成功率显著降低。原有河岸带连续植被廊道被水位波动切割，物种迁移通道中断，基因交流受限加剧种群遗传多样性丧失，群落更新潜力持续弱化^[2]。

3 自然恢复优化策略

3.1 生态修复分区规划

针对长江库岸消落带复杂多样的地貌形态，需依据地形起伏、水文节律及土壤侵蚀程度建立多层次修复分区体系。研究团队结合地理空间分析与水文动态模拟，将消落带划分为侵蚀防控核心区、植被重建重点区及自然保育缓冲带三类功能单元。侵蚀防控核心区集中于基岩裸露、坡面陡峭的岸段，优先选用根系延展性强且固土效能高的攀援植物构建立体防护网络，配套菱形网格植生护面技术，形成抗冲刷生物工程结构；植被重建重点区分布于周期性淹水的中低高程区域，设计耐淹乔木与抗冲灌木的垂直混交模式，利用深根系乔木的锚固作用与灌木的萌蘖特性形成复合防护层，辅以微地形改造措施增强地表径流截留能力；自然保育缓冲带位于人类活动干扰较少的高程过渡带，采取封育管理与疏伐调控相结合的策略，保留原生树种的天然更新过程，维持群落种间竞争的动态平衡。分区规划需与水库调度周期深度协同，建立高程响应动态模型，依据水位涨落阶段调整植被管护重心，确保修复措施与水文节律形成时空适配机制。

3.2 乡土物种筛选培育

针对消落带土壤贫瘠与水文胁迫的复合逆境，系统筛选具有多重抗逆特性的本土植物资源。生理生态学实验揭示了关键适应机制：狗牙根在淹水环境中通过根系结构优化提升氧气传输效率，其分泌物中的有机酸可有效改良土壤理化性质；秋华柳则借助茎秆皮孔增生与导管结构分化增强水分输导与气体交换能力。构建覆盖全域的种质资源保存体系，采用超低温贮藏与离体培养技

术延长种质活力，运用分子标记技术筛选耐逆性状显著的优良单株，定向培育根系发达、抗冲刷能力强的改良品系。在典型试验段实施多物种配置优化：构建乔木-灌木-草本垂直复合群落，乔木层冠幅郁闭后为下层提供遮荫缓冲，灌木层密集根系网络增强土壤抗剪强度，草本层快速覆盖地表减少雨滴溅蚀。研发基于水文节律的种子扩散与萌发调控技术，在退水期采用机械松土与人工撒播结合方式促进种子着床，配套土壤改良剂提升幼苗定居成功率，实现植被自然更新与水位消落过程同步。

3.3 水位适应机制构建

面向周期性水位波动的极端水文条件，构建梯度响应型植被配置体系，将消落带划分为下部高频淹水区、中高程过渡区、高高程干旱区。下部高频淹水区优选湿生植物（其茎秆皮层发达的气腔结构维持根系有氧代谢）。中高程过渡区配置深根系乔木（主根穿透力强获取深层水，侧根扩展固持表土）。高高程干旱区种植耐旱灌木（叶片角质层增厚、气孔调节灵敏应对干旱胁迫）。研发水位波动速率与植被损伤关联模型。当水位骤降超过临界阈值时，启动天然纤维材料与活体木桩组合护坡工程，缓冲水力冲刷动能，并配套速生草本形成生物覆盖层，提升岸坡稳定性。构建多参数生态监测网络（集成土壤水分传感器与茎流监测装置），动态追踪根系吸水与蒸腾耗水规律，为水位调节期植被管护提供量化依据。在典型岸段试点生态护岸技术，采用根系交错型植物与天然材料护坡结构复合设计，形成自修复型岸线防护体系，显著增强消落带生态系统的水文弹性与抗干扰能力^[3]。

3.4 群落结构优化技术

基于消落带生态位分异与资源竞争规律，构建多层次复合型植被空间配置模式。研究团队依据地形起伏与土壤水分梯度差异，设计乔灌草垂直镶嵌结构，在冲沟发育区实施等高草灌篱配置，间隔特定距离布设抗冲草本带拦截径流泥沙；平缓滩地区域采用斑块状混交林设计，每个斑块直径控制在合理范围，内部按比例搭配深根系乔木与萌蘖型灌木，平衡光照资源竞争与土壤养分利用矛盾。引入种间互惠效应模型筛选互利共生组合，优先选择根系分泌物互补的物种搭配，抑制入侵植物生态位扩张。在典型岸段应用近自然经营技术，定期疏伐过密植株并将凋落物粉碎还田，促进土壤有机质累积与微生物活性提升，增强群落抗干扰能力。针对不同高程带微生境特征，调整植被层片厚度与覆盖密度，陡坡区域增加灌木层占比以强化固土功能，缓坡区域扩大草本层覆盖以减少雨滴溅蚀风险，形成空间异质性显著的群

落结构网络。

消落带群落构建需兼顾水平与垂直维度的资源分配效率。在侵蚀沟发育密集区域，采用草灌复合篱笆带与乔木斑块交替布局模式，草本层优先选用须根发达的地被植物，沿沟缘线形成生物屏障；灌木层选择分枝密集的耐旱物种，沿等高线呈带状分布，减缓径流冲刷动能；乔木斑块以深根系乡土树种为核心，间隔嵌入灌木丛形成生态过渡带。平缓区域实施异龄混交林经营，上层保留少量高龄乔木提供遮荫与凋落物输入，中层配置速生灌木加速群落郁闭，下层补植耐阴草本促进地表覆盖。针对土壤贫瘠区域，引入豆科植物与菌根真菌共生体系，利用根瘤固氮与菌丝网络提升土壤肥力。定期开展群落结构诊断，依据冠层透光率与根系分布密度调整物种比例，移除竞争力过强的单一优势种，补植生态位互补的伴生植物，维持群落功能多样性。在季节性淹水区，设计浮水植物与挺水植物过渡带，利用浮叶植物消浪作用保护岸线，挺水植物根系网络稳固底质，形成多层次水文缓冲结构。

3.5 建立动态监测体系

整合多源遥感数据与地面传感设备构建空天地协同监测平台。研究团队部署高分辨率光学卫星与无人机定期获取植被覆盖变化信息，结合光谱特征解析技术识别优势物种分布格局；在地面布设分布式传感器网络，持续采集土壤墒情、根系发育状态及冠层生理参数。建立长江消落带生态数据库，运用时序分析方法提取水位波动与植被演替的滞后响应规律，制定分级预警阈值与应急管护预案。研发智能预警模型，输入历史水文气象数据进行机器学习训练，预测不同情景下植被群落稳定性变化趋势。在重点监测站安装植物生理监测装置，实时追踪淹水胁迫下光合作用效率与水分传输动态，当关键生理指标偏离正常阈值时启动人工干预机制。制定标准化数据质量控制流程，采用信号滤波算法消除环境噪声干扰，确保监测结果时空连续性与精度可靠性。建立多尺度数据融合分析框架，将宏观植被分布变化与微观生理响应数据关联，形成覆盖规划实施、过程调控与效果评估的全链条监测体系。

监测体系需实现水文过程与生态响应的多维度耦合分析。在空间维度上，采用激光雷达扫描技术获取消落

带地形三维模型，结合多光谱影像反演植被生物量空间分布；在时间维度上，布设地下水位监测井与土壤温湿度传感器，构建水文参数连续观测链。研发植被生理状态无损检测装置，叶绿素荧光监测技术评估光合系统受损程度，利用热红外成像识别蒸腾作用异常区域。建立生态阈值动态修正机制，依据长期监测数据优化预警模型参数，提升不同水位情景下的预测准确性。构建数据共享与协同管理平台，集成遥感解译结果、地面实测数据与模型模拟输出，生成生态修复效果动态评估图谱。针对突发性水位骤降事件，启动应急监测预案，加密无人机航拍频次与传感器数据回传间隔，实时追踪岸线崩塌与植被脱水损伤范围。研发自适应管护决策支持系统，依据监测数据自动匹配最优修复技术组合，推荐物种补植时机与群落结构调整方案，形成监测-评估-调控闭环管理链条。在重点岸段布设生态定位观测站，长期追踪群落演替方向与土壤改良进程，为区域尺度生态修复策略优化提供基础数据支撑。

结束语

长江库岸消落带植被自然恢复研究揭示了长江库岸消落带在水文-土壤-植被耦合作用下的生态退化机制，提出了基于分区修复与物种适应性调控的自然恢复优化策略。乡土植物筛选技术、梯度群落配置模式及动态监测体系的综合应用，显著提升了植被抗逆性与生态系统稳定性。未来需深化水位波动-植被响应定量关系研究，完善多尺度修复效果评估框架，推动自然恢复与工程措施协同创新。长期跟踪群落演替与土壤改良进程，将为提升库岸带生态韧性与实现可持续管理提供持续科技支撑，助力流域生态保护与高质量发展战略目标的实现。

参考文献

- [1] 肖志豪, 生悦诚, 汪家鑫, 等. 三峡库区蓄水后消落带边坡变化特征[J]. 黑龙江科学, 2023, 14(02): 64-69.
- [2] 扈玉兴, 袁兴中, 刘红, 等. 适应水位变化的库岸生态防护带设计——以重庆汉丰湖为例[J]. 园林, 2021, 38(06):74-80.
- [3] 刘新荣, 景瑞, 缪露莉, 等. 巫山段消落带岸坡库岸再造模式及典型案例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(07): 1321-1332. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2019.0887.