

水电站库区垂直边坡植物群落构建与生态稳定性研究

乔勇

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司

DOI:10.32629/eep.v9i6.3237

[摘要] 水电站库区垂直边坡在周期性水位涨落和强扰动环境的影响下,生态系统稳定性差,植被恢复及群落重建比较困难。根据垂直边坡生态修复的需求,融合库区立地条件以及水文波动特点,分析植物群落建立的核心影响因素,研究不同植物配置形式和建植技术途径对生态恢复效果的作用机制。借助耐逆性植物筛选、多层次群落结构建立、基质改良技术的融合应用,增加边坡植被覆盖率、生态自我维持能力,增强抗侵蚀、抗干扰能力。从群落结构稳定性、生态功能协同的思路出发,研究垂直边坡生态系统演替的规律,为库区边坡生态修复、长期稳定管理给予理论依据和技术参照。

[关键词] 水电站库区; 垂直边坡; 植物群落构建; 生态稳定性; 生态修复

中图分类号: TV74 **文献标识码:** A

Research on the Construction of Plant Communities and Ecological Stability of Vertical Slopes in Hydropower Station Reservoir Areas

Yong Qiao

China Electric Power Construction Group Northwest Survey and Design Research Institute Co., Ltd.

[Abstract] The vertical slopes in reservoir areas of hydropower stations are subject to periodic water level fluctuations and strong environmental disturbances, resulting in poor ecosystem stability and significant difficulties in vegetation restoration and community reconstruction. In response to the ecological restoration requirements of such slopes, this study integrates site conditions and hydrological fluctuation characteristics of reservoir areas to analyze the key factors influencing plant community establishment, and explores the mechanisms by which different vegetation configuration patterns and establishment techniques affect ecological restoration outcomes. Through the integrated application of stress-tolerant plant selection, multi-layer community structure construction, and substrate improvement technologies, the vegetation coverage, ecological self-sustainability, and resistance to erosion and disturbance are significantly enhanced. From the perspectives of community structural stability and ecological functional synergy, this study further investigates the succession patterns of vertical slope ecosystems, providing theoretical support and technical references for ecological restoration and long-term stable management of reservoir slopes.

[Key words] hydropower reservoir area; vertical slope; plant community construction; ecological stability; ecological restoration

引言

水电站库区垂直边坡属于典型的人工扰动以及自然作用相互作用的区域,其生态环境有着明显的复杂性、不稳定性。由于水位周期性变化的影响,边坡植被会受到淹没、干旱交替胁迫,造成原有生态系统结构破碎,生态功能退化严重。同时坡体结构大多为岩质或者半岩质,土壤层薄且养分缺乏,造成植物自然恢复受阻。在工程建设与生态保护协同发展大背景下,怎样凭借专业配置植物群落达到边坡生态系统快速恢复及长期稳定的目的,变成水电工程生态修复领域的重要研究方向。所以有必要从植

物选择、群落结构建立、生态过程调控等几个方面开展系统研究,增加垂直边坡生态系统的自组织能力、稳定性。

1 水电站库区垂直边坡植被群落构建基础与立地条件分析

1.1 库区垂直边坡地形结构与水文波动特征。水电站库区垂直边坡一般为高陡坡面,分带式高差结构,坡体受水位调节影响形成明显的水陆交替带。不同高程区域淹没频率以及暴露时间差别很大,植被生境就变得非常异质。低位坡面长期处于周期性淹没状态,植物生存时间窗口短,中上部坡段受水位波动影响小,

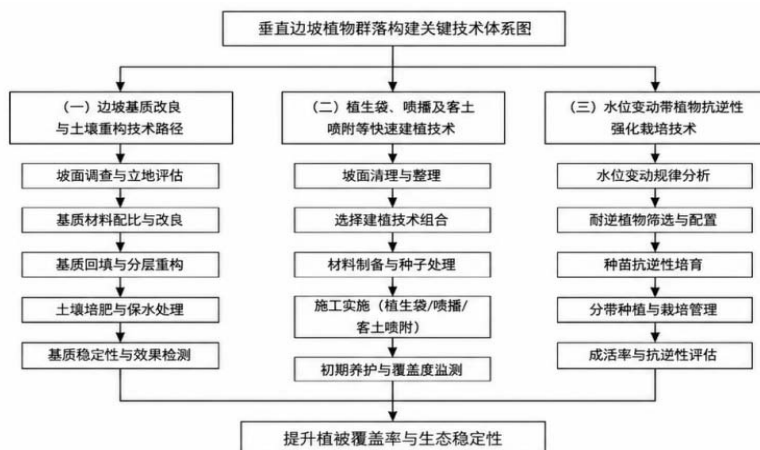


图1 植物群落构建关键技术体系流程图

但还是受到水流冲刷及湿干交替胁迫。水文过程对坡面稳定性有直接影响，水位快速变化容易造成表层土体流失、结构松散，进而影响植物根系固着、群落定植的过程。该类边坡生态环境有着强扰动性以及空间分层的特点。

1. 2边坡土壤理化性质与基质限制因素识别。库区垂直边坡土壤大多发育不充分、结构松散、养分贫瘠，部分区域甚至以裸岩、碎石基质为主，不能形成连续稳定的植被生长层。土壤有机质含量低，氮、磷、钾等主要营养元素供应不足，影响植物早期生长和根系扩展能力。坡面受雨水冲刷影响较大，细颗粒物容易流失，土壤保水能力差，水分供给有间歇性。基质孔隙结构不均衡造成透水性及持水性矛盾突出，在干湿交替的时候容易出现板结或者松散并存的情况。该类限制因素一起作用，使植物在定植初期受到较高的环境胁迫^[1]。

2 水电站库区垂直边坡植物群落类型筛选与配置模式构建

2. 1耐旱耐淹型先锋植物物种筛选机制。垂直边坡植物筛选以适应水位波动和极端环境为原则，主要考虑耐旱以及耐短期淹水的双重适应性。先锋植物一般有着较强的环境适应性，在低养分、不稳定基质的环境下可以迅速完成定植和扩展。筛选过程中要融合考虑根系类型、生长周期、再生能力等指标，优先选择根系发达、水平扩展能力强的草本或者灌木物种。模拟不同的水位变化情景，分析植物存活率和生长表现，可以筛选出适应性较强的重点物种，为后续群落建立给予基础种源支持。同时先锋物种在生态演替初期有重要的稳定基质和改善微环境的作用。

2. 2灌草结合的多层次群落结构配置模式。灌草融合的群落结构建立以增加生态系统稳定性、空间利用效率为目的，凭借不同高度层次植物的合理配置，达到了资源互补、生态协同的目的。草本植物主要起到快速包含、防止水土流失的作用，在短期内形成地表保护层，减少坡面侵蚀风险。灌木植物在中期阶段逐渐形成结构骨架，靠着根系加固以及冠层遮荫作用改良微环境条件。不同层次的植物之间存在光照、水分、养分的竞争关系，起到了增强群落稳定性的作用。在配置过程中要考虑到物种生

长速度的不同以及空间分布的规律，使群落结构慢慢趋向稳定演替的方向。

2. 3乡土植物与外来适生植物的适配性组合策略。在垂直边坡植物配置中，乡土植物有着较强的环境适应性、生态兼容性，是群落稳定的基础组成。外来适生植物在生长速度和包含能力上有着一定的优势，可以早期形成植被覆盖层。两类植物合理搭配可以在生态恢复初期及后期起到互补的作用，增加群落建立的速度。在组合方案上应该先保证乡土植物的主体地位，适量引入适生外来物种增加群落初期稳定性，不能出现生态入侵的风险。凭借动态调整物种比例，使群落结构逐渐过渡到以乡土物种为主导的稳定状态，达到了生态系统长期可持续发展的目的^[2]。

3 水电站库区垂直边坡植物群落构建关键技术体系

3. 1边坡基质改良与土壤重构技术路径。水电站库区垂直边坡基质条件大多为结构松散、有机质含量少、持水能力差等，工程上一般用分层重构和材料复配的方式增加基质稳定性。在实际的技术途径中，客土回填厚度控制在20cm到50cm之间，黏土、腐殖土、砂砾按3: 2: 1的比例混合，可以明显改善孔隙结构以及保水性能。为了增加营养供给能力，在基质中加入有机肥料800—1200g/m²、缓释复合肥80—120g/m²，增加初期植被成活率。同时加入生态胶结剂0. 3%~0. 8%浓度溶液增加坡面抗冲刷能力，使表层抗剪强度增加25%~40%。微地形改造形成凹凸起伏结构，可以增加雨水滞留时间约30%以上，然后给植物根系发育给出稳定的生境条件。

3. 2植生袋、喷播及客土喷附等快速建植技术。快速建植技术在垂直边坡生态恢复中起着关键作用，植生袋技术将基质及植物种子按比例封装后，可以实现坡面分区快速包含，单平方米植生袋重量控制在15—25kg，有利于高陡坡面施工安全。喷播技术使用水力喷播设备，将种子、纤维覆盖物和黏合剂混合喷射到坡面上，喷播厚度一般控制在2—5cm，种子密度约为30—60g/m²，可以在30—60天内形成初期植被覆盖层。客土喷附技术用高压泵将改良土壤均匀喷射到坡面上，喷附层厚度一般为5—10cm，可以增加坡面持水率15%—25%。三种技术融合使用时，植被覆盖率一年内可到了70%以上，雨季坡面侵蚀速率减少约40%^[3]。

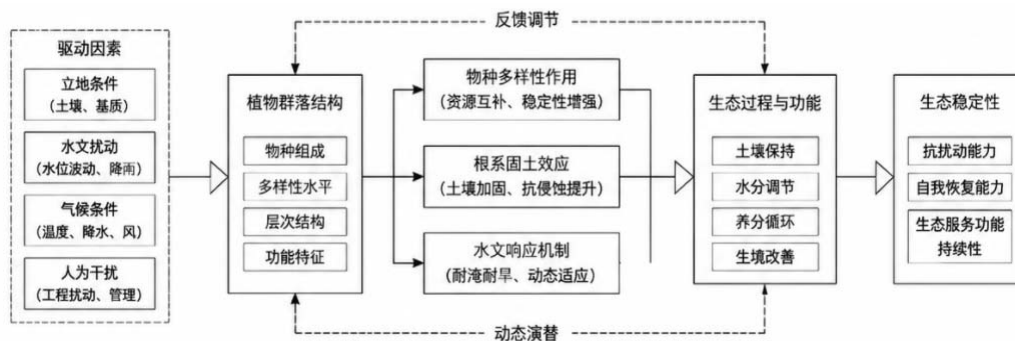


图2 群落生态稳定性影响机制分析图

3. 3水位变动带植物抗逆性强化栽培技术。水位变动带是库区垂直边坡生态系统最不稳定的地方, 需要使用抗逆性强化栽培技术增加植物的适应能力。在种植阶段, 对种苗实行控水炼苗处理, 使种苗在低水分胁迫条件下形成更发达的根系结构, 根冠比增加0.2—0.5。用微生物菌剂处理根际土壤, 使有效菌落数到了 10^7 CFU/g以上, 可以增加植物对水淹及缺氧环境的耐受能力。栽培设计上将耐淹植物配置比例增加到40%到60%, 用分带种植的方式控制不同高程区域物种分布。同时融合缓释水分调节材料, 使根际含水率保持在18%到25%之间, 减少水位波动对植物生理活动的冲击, 增加整体成活率20%以上。图1为植物群落建立核心技术体系流程图。

4 水电站库区垂直边坡植物群落生态稳定性影响机制

4. 1群落物种多样性对生态稳定性的调控作用。物种多样性在垂直边坡生态系统稳定性中起着基础性调控作用, 物种丰富度由5种增加到15种时, 群落整体生物量可以增加约35%到60%, 系统抗扰动能力明显提高。多样化群落借助资源分异机制减少竞争压力, 使光能利用率增加18%到25%, 不同根系深度结构可以形成0到80cm土层的立体利用格局, 使土壤水分利用效率达到22%。多样性指数(Shannon指数)每增加1.0个单位, 坡面侵蚀模数下降28%。功能性状互补使群落在干旱以及淹水交替的条件下依旧保持较高的稳定性, 在水位涨落频率到了每月2—3次的区域, 物种冗余结构可以有效地避免单一物种衰退造成的系统崩溃风险。

4. 2根系固土效应与边坡抗侵蚀能力耦合机制。植物根系靠着机械加固以及土体黏结作用明显提高边坡稳定性, 不同根系类型对抗侵蚀能力存在较大差异。草本植物细根密度可达 $2.5—4.0\text{ km/m}^3$, 可有效增强表层0—20cm土体抗剪强度约20%—35%。灌木植物主根深达1.5—3.0m, 靠着深层锚固作用把坡体整体稳定系数增加0.15—0.30。实验观测结果表明, 根系生物量每增加10%, 坡面径流侵蚀量就会减少12%到18%。根系分泌物中的多糖类物质可以助推土壤团聚体的形成, 使团粒结构比例达到了45%以上, 然后增加抗冲刷能力。高强度降雨(降雨强度 $\geq 50\text{ mm/h}$)下, 植被包含坡面的泥沙流失量比裸坡低60%~85%, 有明显的耦合稳定效应。

4. 3水文扰动条件下群落结构动态响应特征。水文扰动是库区垂直边坡群落结构变化的主要驱动力, 水位在10—30m范围内周期性波动时, 植物群落表现出明显的动态重组特征。在高频淹水区域, 耐水淹物种占比可达70%以上, 在中高位区域, 耐旱型物种逐渐占优势。群落盖度在水位上升阶段平均下降15%到25%, 但是退水后30到60天内可以恢复到原有水平的80%到95%^[4]。种群更新速率同水位变化频率存在正相关关系, 扰动频率到了每月3次以上的时候, 先锋物种更新率会增加约40%。同时群落结构复杂度在长期扰动作用下表现“先简化后重构”的趋势, 物种替代速率平均为0.12—0.18/年。经过长时间的监测可以发现, 群落稳定性指数在3到5年后逐渐趋于稳定区间0.65到0.80, 说明系统有一定的自我恢复和适应能力, 见图2。

5 结语

水电站库区垂直边坡植物群落建立与生态稳定性研究显示, 繁复水文扰动及立地条件限制一起决定边坡生态恢复的难易程度以及选择途径。使用基质改良、快速建植技术、多层次群落配置相结合的方式, 可以明显提高植被覆盖度和初期成活率, 增加坡面抗侵蚀能力。群落演替期间, 物种多样性、根系固土作用以及水文适应性一起形成稳定的生态调控网络。以多指标评定、动态监测为基础的调控方略, 可以实现群落结构的改良和长期的稳定维持, 给库区垂直边坡生态修复给出系统的技术支撑及实践参照。

[参考文献]

- [1]胡梅丛, 徐星. 水电站坝基边坡变形破坏机制及加固措施[J]. 工程技术研究, 2026, 11(08): 170—172.
- [2]王天星. 浅析某水电站岩质边坡绿化技术[J]. 四川水力发电, 2026, 45(02): 109—113.
- [3]邵元. 基于多基准站与监测网平差的北斗变形监测方法研究——以龙滩水电站边坡为例[J]. 红水河, 2026, 45(01): 30—34+54.
- [4]马飞朋, 司徒鹏, 刘艳领, 等. 白龙江苗家坝水电站枢纽区边坡危岩体灾害分析研究[J]. 西北水电, 2026, (01): 74—80+94.

作者简介:

乔勇(1993—), 女, 汉族, 安徽省阜阳市人, 研究生, 中级职称, 主要研究方向为生态修复生态治理方面。