

基于生态修复的水电站坝区植被恢复与水土保持技术

李勇

中国水利水电第十二工程局有限公司, 浙江 杭州 310030

[摘要]西南地区某大型水电站大坝坐落在川西高原的一条支流上, 处于高山深谷区域, 气候干旱寒冷时间较长, 地形坡度大, 易发生滑坡泥石流等地质灾害, 生态环境极其敏感脆弱; 水电站建设过程不可避免会对环境造成边坡垮塌、水土流失、植物死亡退化等问题。针对该水电站工程背景, 从坝区生态条件入手, 对坝区开展生态修复理念下植被治理及水保措施的研究。研究表明, 高寒高海拔地区生态系统非常薄弱而且自然条件极端恶劣, 在工程建设过程中进行生态恢复难度极大。海拔在 2700m 以下的优势树种有: 金合欢、余甘子、油橄榄; 海拔 2700~3500m 的优势树种是云南松、白桦、杜鹃; 海拔超过 3500~4500m 的优势树种有长苞冷杉、杜鹃、冷箭竹等。详细地介绍了适合生长植物的选择及植物群落配置、陡峭边坡绿化种植、坡地保护与排水沟的设计、水土保持和防止边坡崩塌的一体化技术, 形成了工程技术和生物技术相结合的方式方法。西南诸河上游重大水电工程扰动区的研究重点在于抗逆乡土植物选育以及耐寒旱抗侵蚀植生基质创制和水电工程扰动边坡防护与生态修复多元化协同等关键技术难题上的攻克, 研究结果可以给西南诸河上游重大水电工程扰动区边坡生态防护提供一揽子解决方案。

[关键词]生态修复; 水电站坝区; 植被恢复; 水土保持

DOI: 10.33142/ect.v4i3.19414

中图分类号: S157

文献标识码: A

Vegetation Restoration and Soil and Water Conservation Technology for Hydropower Dam Area Based on Ecological Restoration

LI Yong

Sinohydro Bureau 12 Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310030, China

Abstract: A large hydropower station dam in the southwestern region is located on a tributary of the western Sichuan Plateau, in a high mountain and deep valley area. The climate is dry and cold for a long time, the terrain slope is large, and geological disasters such as landslides and mudslides are prone to occur. The ecological environment is extremely sensitive and fragile; The construction process of hydropower stations inevitably causes problems such as slope collapse, soil erosion, plant death and degradation to the environment. Based on the background of the hydropower station project, starting from the ecological conditions of the dam area, research is conducted on vegetation management and water conservation measures under the concept of ecological restoration in the dam area. The research results indicate that the ecosystem in high-altitude and cold regions is very weak and the natural conditions are extremely harsh, making it extremely difficult to carry out ecological restoration during engineering construction. The dominant tree species below 2,700 meters in altitude are: Acacia, Phyllanthus, and Olives; The dominant tree species at altitudes of 2,700 to 3,500 meters are Yunnan pine, birch, and rhododendron; The dominant tree species at altitudes exceeding 3,500 to 4,500 meters include long bract spruce, rhododendron, and cold arrow bamboo. A detailed introduction was given on the selection of suitable plants for growth, plant community configuration, steep slope greening planting, slope protection and drainage ditch design, integrated technology for soil and water conservation and prevention of slope collapse, forming a combination of engineering technology and biotechnology. The research focus on the disturbance area of major hydropower projects in the upper reaches of the southwestern rivers is on the selection of stress resistant native plants, the creation of cold and drought resistant and erosion resistant plant substrates, and the diversified coordination of slope protection and ecological restoration caused by hydropower engineering disturbance. The research results can provide a comprehensive solution for slope ecological protection in the disturbance area of major hydropower projects in the upper reaches of the southwestern rivers.

Keywords: ecological restoration; hydroelectric dam area; vegetation restoration; soil and water conservation

引言

西南地区河流的气候变化、地貌差异、地质差异明显, 是中国“三区四带”的重要生态防线; 上游海拔落差大、水力资源丰富, 是中国重要的水电能源基地。水电工程不可避免会产生边坡开裂变形、水土流失、植被破坏等问题。

此水电站位于西南某一干流与支流交汇处下游大概 2 公里的河段, 坝体高达 303m, 是目前世界上最高土石坝, 水库正常蓄水位海拔为 2865m, 库容量达到 108 亿 t。川西北高原气候干旱寒冷, 冬季时间较长, 山脉较为险峻, 容易发生滑坡、泥石流等地质灾害, 这种气候环境以及地

质环境不利于植物生长。在西南某流域中游河段水电开发建设项目的基础上，在研究区内开展植被典型调查，结合工程的影响类型以及差异化的立地环境，可以制定出不同的工程影响区不同海拔层次上相应的植被修复措施和植被组合方案。如何在保证工程安全前提下，使受损生态系统得到有效治理是水电工程面临的重要难题。本文以西南某大型水电站大坝为基础，针对高原高寒峡谷地形独特的地理环境，开展了基于生态修复理念的大坝区植被修复及水土保持体系的研究工作，以便为类似工程提供借鉴。

1 水电站坝区生态环境特征

本水电站坝区位于青藏高原东南缘横断山区地带，区域内地形陡峭，河深谷窄，相对高差较大。坝址区河谷呈“V”形，河床岩土体结构较差，岸坡十分陡峭，陡坡角一般都在 30°以上，局部甚至高达 70°左右，岩体中主要以砂板岩为主，岩体强烈风化剥蚀，断层、裂隙发育，工程地质条件复杂，病害点较多。坝区地处高原寒温带湿润气候带，在这里平均气温为 10.9℃，极端最低气温为 -15.9℃，平均年降水量约为 700mm，但雨季与旱季明显，5~10 月份雨季，降雨比较集中，11 月份至第二年的 4 月份为旱季，降水较少而蒸发量很大，而且经常有大风吹来，平均风速为 2.5m/s，最大风速达到 25m/s 左右。坝区土壤质地以山地棕壤、褐土为主，土层瘠薄、有机质少，土体抗蚀能力弱。受地理条件及气候因素制约，土壤呈显著垂直变化特点，海拔 2600~3200m 为褐土带，3200~3800m 为棕壤带。由于坡陡土薄，土壤抗蚀力差。坝区地带植被属于四川西部高山峡谷针叶林地带，天然植被主要是高山松、云杉、冷杉等，林下灌丛主要有杜鹃花科的杜鹃、禾本科的箭竹等。但由于长期的人类活动，原始植被破坏殆尽，现有的植被大多是由次生杂木丛与草丛构成，覆盖率很低，生态环境遭到破坏。针对工程建设特点，主体工程区土质和土石边坡生境类型宜以灌草植物种植为主；岩质边坡恶劣生境类型宜以草本及攀援植物种植为主；弃渣场、取土场生境类型宜以灌草植物种植为主；施工工地等生境类型宜以乔灌草植物种植为主。施工扰动是水库区水土流失的重要成因。工程建设中，库区坝基开挖、弃渣堆存、公路建设大面积改变地表环境，破除了原有的自然植被，造成了大量的裸露边坡及碎石土体堆积物等一系列水土流失问题。水土流失类型主要是水力侵蚀，伴随重力侵蚀和少量风力侵蚀等；侵蚀强度具有明显的时空差异性：空间上以弃渣场、开挖边坡、施工道路区最为强烈。时间上以施工期和植被恢复初期最为突出。

2 坝区植被恢复关键技术

2.1 植被恢复模式选择与配置

针对坝区高寒干旱、坡陡土薄的立地条件，在植被恢复时应坚持“适地适树、乔灌草结合、生态与景观协调发展”的原则，对坝区不同立地分 3 个恢复单元，分别是：

平原缓坡台地 (<25°) 以乔灌草结合为主，采用乡土树木为骨干、灌木为填充、草本为覆盖，营造近自然群落；丘陵陡坡地 (25°~45°) 采取灌草为主的组合方式，大力修复根系发达的灌木和匍匐性草本植物，提高固土护坡的作用。高陡边坡地 (>45°) 以草本先锋种群为主，速生耐旱草本植物作为先锋，待立地条件良好之后再引种灌木等。同时，对各层之间植物功能性状进行合理搭配。深根植物和浅根植物相结合来提高边坡整体结构稳定性，固态植物搭配非固态植物来提高土质肥力，常绿植物搭配落叶植物达到全年常绿的目的，在优化的同时构成结构合理，功能齐全的植物群落达到生态与景观统一的效果。

2.2 适生植物筛选与群落构建

适宜植物的选择是植被重建成败的基础，面对坝区高寒干燥恶劣自然条件，其选择的标准主要有：抗寒耐旱性强，扎根深固持力强，生长快覆盖强，种子易得繁殖成本低等，按照以上标准，进行野外考察以及引种试验，选出适合坝区本地植物种类。

表 1 坝区不同海拔梯度适生植物配置

海拔范围	优势物种	配置模式	应用区域
<2700m	金合欢、余甘子、油橄榄、悬钩子、火棘、黄茅、苜蓿	乔灌草复合	坝下河岸带
2700~3500m	云南松、白桦、杜鹃、川滇高山栎、四川莎草、旱茅	灌草主导	坝肩缓坡、道路边坡
3500~4500m	长苞冷杉、杜鹃、冷箭竹、西南委陵菜、异针茅	草本先锋	高陡边坡、弃渣场
>4500m	风毛菊、红景天、侧茎垂头菊、矮金莲花	草本覆盖	高海拔扰动区

对于乡土地方古树资源应该实行重点保护，本工程在淹没区采取保护移植的方式，共移植野生桑树、槭树、核桃树等 22 个树种共计 2853 株，其中百年以上的古树 23 株，成活发芽率高达 90% 以上。此次行为也为坝区植被恢复提供了可贵的乡土地质资源。群落建立要模拟自然植物群落演替过程，先期利用速生型草本类植物迅速占领地面，防止土壤侵蚀，中期种植耐阴灌木丰富植物层次结构，后期补植目的乔木使演替向顶级群落下落，在此期间要做好群落监测工作及时做出相应管理方案。

2.3 高陡边坡植被恢复难点与对策

高陡边坡是坝区植被修复最大的困难，主要存在的问题是：坡面太陡 (大于 50°)，植物材料不易附着；岩体裸露，土地少，立地条件恶劣；干热河谷环境，水分迅速流失，植物存活率低；施工量大，危险系数高。对上述难题，提出了如下解决方案：框格梁施工技术来克服高陡边坡问题，通过削坡、减载、设置齿墙、排水孔、截水沟等综合处理措施保障边坡稳定；根据边坡土壤和气候选择生命力强的草种，在植物材料不容易附着的地方用植生袋施工，U 型钢丝网片固定在框格梁内部并撒入肥料、生长素等均匀喷洒在表面，等到覆土完成后用液压喷播。另外，

在涨落区岩石岸坡上使用了以有机质层、反滤垫、草皮增厚垫以及锚固系统组成的 OATA 生态防护结构,既能防止水流冲刷和波浪侵蚀,又能有利于岸坡上的植物生长从而达到保护岸坡和生态治理的目的。

3 水土保持工程技术体系

3.1 坡面防护与截排水系统设计

坡面防护及截排水系统构成了水土保持的主体工程,截水沟设置于边坡之上以及各段马道内侧,起着拦截坡面径流的作用,降低雨水对边坡的直接侵蚀。边坡护砌结构由边坡坡体构成,该结构之上有截水沟,截水沟周围有植被覆盖,截水沟下部有排水管道,同时边坡坡体下部还有排水沟;在截水沟一侧设置溢流槽以实现暴雨期间截水排水、减缓水流速度防止雨水渗透进边坡结构之中的功效。排水系统的设计要符合“截、引、排、蓄”的要求,在边坡顶部设置了截水沟拦截上坡来水,而在马道处设置了排水沟导引坡面地表水进入,而坡底处的排水沟则用于收集排出场外。冲沟分布的地方要加强跌水,消力池等设施以避免水流聚集侵蚀。

3.2 护坡工程与生态护岸技术

护坡工程是预防边坡滑坡的重要手段,在不同的边坡类型和坡度情况下采取不同的护坡方式:对于土质边坡采取植被或者三维网植草护坡;对于土石混合边坡采用框格植草护坡;对于岩石边坡采用挂网喷播或者生态袋护坡。经五年的时间,项目区坡地植被覆盖率可达 98%以上,灌木群落完成了正向演替,群落结构稳定且茂密,水土保持良好^[1]。修复区在密度植被覆盖以及增强基材层的双重作用下有效地控制了雨水冲刷,土壤结稳定性及抗蚀性能得到了很大的提高。生态护坡工程技术应用到库岸以及河岸边,使用格宾石笼网、生态混凝土砌块等材料,在保证工程的同时也起到绿化的作用。

3.3 防冲刷与防滑塌综合治理

冲刷防治和防止崩塌主要依靠工程防护措施与植物防护相结合。对于碎散堆积物,采取挡渣墙、拦渣坝等拦截设施以及截排洪系统来抑制冲刷作用^[2];对有可能发生崩塌地段进行削坡减载、抗滑桩、锚固等工程加固措施。在水电站建设中对工程占地部分进行剥离表土储存起来共储存表土 38.34 万方,用于以后的土地整治及植被恢复。通过调整大坝体型减小填筑体积,减少工程土石方开挖约 22.7 万方,开挖再利用量提高 103.7 万方。并且在弃渣场脚下设置了石笼挡墙及喷播草皮相结合的边坡防护方式,提高坡面抗冲性能。经过治理,达到水土流失面积、流失强度降低,林草植被恢复率、覆盖率提高的目的。

4 生态修复与水土保持协同实施技术

4.1 工程措施与生物措施耦合机制

生态修复工程措施与生物措施结合是关键所在。工程

措施先进行对边坡的治理,之后再实施一些生物措施,生物措施能够增加工程措施的稳定性。具体的耦合方式有:工程措施中稳定边坡,建立排水系统后,再进行植被保护,在植被的作用下可以减少一些工程后期的养护投入;工程措施中使用植被根系稳固表层土壤,从而减少工程维护费用;工程保护措施中使用植被基质替代传统的喷锚,达到保护与绿化二合一的效果^[3]。对于西南地区河流高寒干旱极端气候水电工程对边坡生态系统的影响以及如何在这样的条件下进行植物选择的问题,则需要研究工程扰动加冻融干旱胁迫下本土植物抗性的形成,多样性保持的方式,还有植被基材“水-土-气-生”的作用机制及其韧性等。利用抗逆乡土植物培育以及耐寒、旱抗侵蚀的植生基质研制来达到边坡植被防护及生态修复一体化。

4.2 不同功能区差异化治理

针对不同功能区存在的问题进行有针对性防治措施。坝肩开挖区主要是较陡峭岩性边坡,采用挂网喷锚结合客土喷播,配以藤本植物垂直绿化;弃渣场主要是堆积松散体,先修建拦挡及截排水系统在覆土形成乔灌草群落;施工道路区主要是路堑路堤,采用框格植草护坡加行道树种植;施工生产生活区以地表压实为主,经过整平场地全部复垦或者复绿;通过对高边坡进行削坡减重、设置齿墙、排水孔、截水沟等多项综合治理手段,在保证高边坡安全的前提下结合当地土壤条件,以及气候特征,选择适宜本地生长的植物种类,达到高边坡稳定同生态修复相结合的效果。

4.3 智能监测与动态调控技术应用

智能化监控和动态控制是生态治理成果的保证。搭建空地一体化立体化监测系统:通过卫星对大范围植物覆盖率进行观测,无人机针对特定地点进行详细拍摄,地面传感器对天气、土壤湿度、边坡变化等细微情况加以测量。搭建 BIHGIS 实时监测系统平台,实施层次识别-桩体感知-全方位监测的一体化过程;开发抗冲击式土压力计、柔韧型智能位移计等新型传感器以及光纤-振弦-体化监测设备,建设三维形变-渗流-应力动态监控机制。依据监测信息及时优化保养策略,在干旱季节进行补水,在雨季补种草籽,在局部地区补充植株等,使生态环境修复效果不断优化。

5 结语

文章针对西南某大型水电站大坝的实际工程项目,对基于“绿水青山就是金山银山”为核心的坝区植被恢复及水土保持技术进行了系统的研究,在分析了坝区环境特点的基础上提出了适合当地生长的本土植物选择及群落配置技术、高陡坡地植被恢复技术、坡面防护以及排导水系统的设计技术、防冲刷滑移防治技术等关键技术。经多年治理,达到了水土流失面积减少、强度减弱的同时,林草植被恢复面积及覆盖面积增加的生态目标,工程措施和技

术措施相互结合,分区治理,智能化动态管理形成了有效的技术体系。研究结果可以为西南诸河上游大型水电工程建设扰动区边坡生态防护提供综合化方案,对于协调水电开发生态保护具有重要的参考意义。

[参考文献]

[1]蒋文翠,金冠锋,孔维博,等.高寒高海拔地区植被特征及工程扰动区生态修复研究[J].甘肃科学学报,2024,36(1):31-37.

[2]冀晓东,汪飞,李景吉,等.西南诸河上游重大水电工程扰

动区一体化边坡防护与生态修复技术研究[J].中国水土保持科学(中英文),2025,23(6):1-8.

[3]阮长明,马绍东,王必海,等.金沙江干热河谷不同区段植被恢复对水土保持特征的影响[J].中国水土保持科学(中英文),2025,23(1):90-101.

作者简介:李勇(1982.4—),男,毕业院校:武汉科技大学,所学专业:安全工程,当前就职单位:中国水利水电第十二工程局有限公司,职务:项目副经理,职称级别:高级工程师。