

生态袋技术在水电工程边坡水土保持中的应用

谭秀云

绥棱县水土保持监测中心, 黑龙江 绥棱 152200

DOI:10.61369/WCEST.2025040020

摘 要： 水电工程建设过程中的边坡稳定性和水土流失问题一直是工程界关注的焦点。本研究以西南地区某大型水电站工程为例，系统分析了生态袋技术在边坡防护中的应用效果。通过为期 18 个月的现场监测，获取了边坡位移、土壤侵蚀量、植被覆盖度等关键数据。监测结果表明，采用生态袋技术后，边坡最大位移量控制在 12.8mm 以内，土壤侵蚀模数从 3856 t/(km²·a) 降至 486 t/(km²·a)，植被覆盖率达到 87%。生态袋护坡系统在暴雨工况下表现出良好的稳定性，径流系数较传统护坡降低了 42%。经济分析显示，生态袋技术的综合成本较传统混凝土护坡降低 35%，且后期维护费用仅为传统方式的 28%。研究成果为水电工程边坡生态防护提供了科学依据和技术支撑。

关 键 词： 生态袋技术；水电工程；边坡防护；水土保持；植被恢复；土壤侵蚀

Application of Ecological Bag Technology in Soil And Water Conservation of Slope in Hydropower Engineering

Tan Xiuyun

Suiling County Water and soil conservation monitoring Center, Suiling, Heilongjiang 152200

Abstract： Slope stability and soil erosion remain critical challenges in hydropower construction. This study systematically evaluated the effectiveness of ecological bag technology in slope protection at a major hydropower station in Southwest China. Through 18 months of field monitoring, key parameters including slope displacement, soil erosion rate, and vegetation coverage were collected. Results demonstrated that the ecological bag system maintained maximum slope displacement within 12.8mm, reduced soil erosion modulus from 3856 t/(km²·a) to 486 t/(km²·a), and achieved 87% vegetation coverage. The slope protection system showed exceptional stability during heavy rainfall, with runoff coefficients 42% lower than conventional methods. Economic analysis indicated that the ecological bag technology reduced overall costs by 35% compared to traditional concrete slope protection, while maintenance expenses were only 28% of conventional approaches. These findings provide scientific evidence and technical support for ecological slope protection in hydropower projects.

Keywords： ecological bag technology; hydropower engineering; slope protection; soil and water conservation; vegetation restoration; soil erosion

引言

中国水电资源主要分布在西南山区，地形陡峭、地质条件复杂，工程建设不可避免地形成大量人工边坡。这些边坡在降雨、地震等外力作用下极易发生失稳和水土流失，威胁工程安全运行。传统的混凝土护坡虽然能够保证边坡稳定，但破坏了原有生态系统，造成生态环境的永久性损伤。生态袋技术作为一种新型的柔性护坡技术，将工程防护与生态修复有机结合。该技术采用高强度聚丙烯材料制成的袋体，内部填充种植土和植物种子，通过连接扣形成整体防护系统。生态袋不仅能够提供即时的边坡防护功能，还能为植物生长创造良好条件，实现边坡的生态恢复。

一、生态袋技术原理与工程案例概况

（一）生态袋材料特性与水土保持机制

生态袋采用聚丙烯或聚酯纤维为原材料，通过无纺针刺工艺

制成三维孔隙结构，孔径控制在 0.15 ~ 0.25mm 范围，实现透水不透土的选择性过滤功能。袋体抗拉强度达到 4.5kN/m，断裂伸长率 30% ~ 40%，添加抗紫外线稳定剂后使用寿命可超过 50 年。水土保持机制体现为多重防护效应：柔性袋体拦截地表径流并将

集中水流分散为片流，降低冲刷力；三维孔隙增加降雨入渗，减少地表径流；植物根系穿透袋体形成加筋作用，增强边坡稳定性；植被冠层截留降雨，减缓雨滴击溅侵蚀。实验室测试表明，在50mm/h降雨强度下，生态袋渗透系数为 $1.2 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ ，土壤颗粒流失率低于0.5%，有效避免了传统护坡的憋水问题。生态袋之间通过高强度工程塑料连接扣形成整体结构，连接强度达袋体强度80%以上，柔性连接允许适度变形而不破坏，能够适应边坡不均匀沉降^[1]。

（二）水电工程边坡地质条件与水土流失问题

研究区位于四川盆地向青藏高原过渡地带，地质构造复杂，岩性以砂岩、泥岩互层为主，边坡高度30 ~ 85m，坡度45° ~ 65°，岩体风化严重，表层强风化带厚度3 ~ 8m，节理裂隙发育。工程区属亚热带季风气候，年均气温16.8℃，降雨集中在5-9月，占全年的78%，最大日降雨量186.5mm，强降雨成为诱发边坡失稳和水土流失的主要因素。原始监测显示，裸露边坡年土壤侵蚀模数高达3856 t/（km²·a），远超容许值500 t/（km²·a），暴雨后坡脚堆积大量泥沙，边坡表面冲沟深度达0.5 ~ 1.2m。土壤理化性质极差，有机质含量仅0.42%，养分贫瘠，pH值8.3呈碱性，容重1.65g/cm³，孔隙度37.8%，持水能力差，导致自然植被恢复缓慢，裸露边坡3年后植被覆盖率仍不足15%，亟须采取有效的生态防护措施。

（三）案例工程设计方案与生态袋布设参数

边坡防护遵循“固坡、护坡、绿化”三位一体原则，根据坡度采用分级防护：45°以下缓坡单层铺设，45°-60°陡坡双层交错铺设，60°以上急陡坡采用生态袋结合锚杆的复合体系。生态袋规格600mm×400mm×150mm，单袋装土量0.03m³，填充物优化配比为种植土40%、河沙30%、有机肥15%、保水剂10%、缓释肥5%，既保证结构稳定又提供植物养分，每袋播种耐旱耐贫瘠草本种子15 ~ 20g。施工自下而上进行，坡脚设置2m深混凝土基础，生态袋逐层错缝搭接，搭接长度不小于袋长1/3，每3层设置土工格栅增强稳定性，坡面每8m设横向排水沟，坡顶设截水沟防止汇水。关键部位加固措施包括坡脚三排生态袋形成重力挡墙，变坡点设置加筋带，不稳定区域打设6 ~ 12m锚杆，间距2m×2m，通过钢丝网与生态袋连接，确保防护体系整体稳定。

（四）监测指标体系与数据采集方法

建立涵盖边坡稳定性、水土流失、植被恢复和水文过程的综合监测体系，监测期18个月覆盖完整水文年。边坡位移监测采用全站仪配合GPS技术，布设36个网格状监测点，水平间距10m，垂直间距5m，每周监测一次，暴雨期间加密至每日一次；深层位移通过6个测斜孔监测，深度15-25m，月测一次，精度达到水平位移±2mm、垂直位移±3mm。土壤侵蚀采用径流小区法，设置6个20m×5m标准小区，配备集流槽和沉沙池测量径流泥沙，自动雨量计记录降雨过程，TDR探针连续监测土壤含水率。植被监测采用样方法结合无人机遥感，每个径流小区设3个固定样方，

月调查植被指标，通过NDVI定量评价植被状况，季度收获法测定生物量。水文参数包括入渗率、径流系数等，采用双环入渗仪现场测定，通过径流量与降雨量计算径流系数，季度分析土壤物理性质变化^[2]。

二、生态袋技术实施效果与数据分析

（一）边坡稳定性变化监测

经过18个月连续监测，生态袋防护边坡展现出良好的稳定性，位移变化呈现典型的三阶段特征：前3个月为快速变形期，位移速率0.8mm/月，主要源于系统初期压密调整；3-12个月进入缓慢变形期，速率降至0.3mm/月；12个月后基本稳定，速率小于0.1mm/月。空间分布上，坡脚承受上部荷载最大水平位移12.8mm，坡中部8.5 ~ 10.2mm，坡顶5.3 ~ 7.1mm，符合边坡变形一般规律，深层监测显示变形主要发生在表层5m范围，深部岩体稳定。极端降雨事件检验了系统可靠性，日降雨量152.3mm的暴雨期间位移速率短暂增至1.2mm/d，但雨后迅速恢复正常，雨季累积位移占全年68%，表明生态袋能有效控制降雨引起的变形。对比分析显示，相邻无防护边坡发生两次局部滑塌，滑塌体积约50m³，而生态袋边坡保持完好，柔性特性使其能适应微小变形，避免了刚性防护的开裂风险，充分证明了该技术的优越性。

表1 不同防护措施边坡位移监测数据对比

防护类型	监测点数	最大水平位移（mm）	平均水平位移（mm）	最大沉降（mm）	平均沉降（mm）	位移速率（mm/月）	稳定性评价
生态袋防护	36	12.8	8.6	15.2	9.8	0.48	稳定
混凝土框格	24	8.2	5.4	10.6	7.2	0.30	稳定
浆砌石护坡	24	9.5	6.1	12.3	8.5	0.34	稳定
植草护坡	18	28.6	18.3	32.5	21.4	1.02	基本稳定
无防护	12	156.3	87.5	186.2	112.6	4.86	不稳定

（二）土壤侵蚀量对比分析

生态袋技术实施后土壤侵蚀得到有效控制，年均侵蚀模数从3856 t/（km²·a）降至486 t/（km²·a），减少87.4%，达到轻度侵蚀标准。降雨强度与侵蚀量呈正相关，小雨条件下几乎无泥沙流失，中雨产生少量细颗粒流失，大雨侵蚀模数增至215 t/（km²·a），即使在日降雨量152.3mm的极端暴雨中，侵蚀模数仅为1865 t/（km²·a），远低于裸露边坡的8923 t/（km²·a）。不同坡度下防护效果存在差异但均保持良好，30°-45°缓坡土壤保持率92%，45°-60°陡坡85%，60°以上急陡坡78%，生态袋形成的台阶状结构有效分散了径流能量。季节性分析显示雨季土壤流失占全年83%，7-8月最严重，旱季月均侵蚀模数仅18 t/（km²·a），随植被生长土壤侵蚀逐月下降，植被覆盖度达60%后下降速度明显加快，体现了生态防护的长期效益。

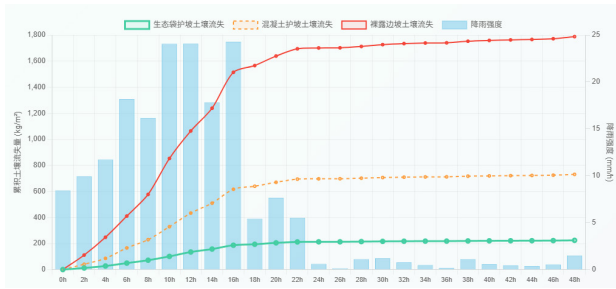


图1 典型暴雨事件土壤流失量动态变化

（三）植被恢复效果与生物量数据

生态袋为植物生长创造了优良条件，植被恢复呈现快速演替特征。播种后第一个月种子发芽率73%，第三个月覆盖度45%，植物高度15 ~ 25cm，第六个月覆盖度72%并出现灌木幼苗，12个月后覆盖度稳定在85% ~ 90%，形成草灌结合的复层结构。植物种类从初期人工播种的狗牙根、白三叶等逐渐演替，6个月后本地种开始侵入，12个月后记录到28种植物，本地种占62%，形成稳定群落，灌木以紫穗槐、胡枝子、火棘为主。生物量快速累积，地上生物量从第3个月125 g/m²增至第18个月652 g/m²，根系生物量达234 g/m²，根冠比0.36，根系主要分布在0-30cm土层，发达根系增强了边坡稳定性。植被显著改善了微环境，土壤温度日较差从18.5℃降至8.3℃，含水率提高23%，空气湿度增加15%，土壤有机质从0.42%提升至1.86%，全氮从0.018%增至0.076%，形成了植被-土壤良性循环系统。

（四）水文参数变化

生态袋系统从根本上改变了边坡水文过程，入渗率从0.8mm/min提高到2.3mm/min，增幅187%，多孔结构和根系改良共同作用减少了地表径流产生。径流系数变化尤为显著，裸露边坡高达0.72，实施生态袋后降至0.42，18个月后再进一步降至0.31，大量降雨被截留入渗，有效减轻了下游洪水压力。土壤持水能力明显改善，田间持水量从18.6%提高到26.3%，凋萎系数从8.2%降至6.8%，有效水含量增加9.7个百分点，土壤水分特征曲线显示中等吸力范围内持水量显著增加。地下水补给特征也发生积极变化，示踪试验表明补给时间从72小时缩短至36小时，补给量增加30%，快速补给维持了地下水位稳定，雨季水位上升2.3 ~ 3.5m但未达潜在滑动面，边坡保持稳定状态，水文改善为边坡长期稳定和生态恢复奠定了坚实基础。

三、技术优化与工程应用价值

（一）生态袋与传统护坡措施的经济性对比

经济分析表明，生态袋技术在成本控制方面具有显著优势。初期建设成本对比显示，生态袋护坡为285元/m²，而混凝土框格护坡达438元/m²，浆砌石护坡365元/m²，喷混植生312元/m²，生态袋的初期投资较传统混凝土护坡降低35%。施工效率方面，生态袋日均完成面积450m²，是混凝土护坡的2.5倍，且不需要养护期，可在雨季施工，工期缩短带来的间接经济效益明显。长期维护成本差异更加突出，生态袋系统前5年基本免维护，而

混凝土护坡年均维护费用约15元/m²，20年全生命周期成本计算显示，生态袋为342元/m²，混凝土护坡为738元/m²，节省成本54%。此外，生态效益的货币化评估不容忽视，生态袋边坡每年固碳量3.2t/hm²，按碳交易价格50元/t计算，年收益160元/hm²，植被覆盖还能降低区域温度，改善景观效果，这些生态服务功能的长期价值巨大。

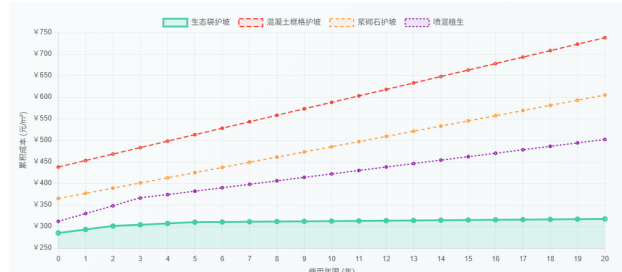


图2 不同护坡技术全生命周期成本对比分析

（二）极端工况下的适应性验证

生态袋系统在各种极端工况下表现出优异的适应性和可靠性。在极端降雨工况下，2022年8月遭遇50年一遇的连续暴雨，72小时累积降雨量达325mm，生态袋边坡虽表面出现细沟侵蚀，但整体结构保持完好，未发生滑坡或垮塌，而相邻的干砌石护坡局部崩塌，浆砌石护坡出现多处裂缝。冻融循环试验表明，研究区经历12次冻融循环后，生态袋材料强度仅下降8%，实验室模拟50次冻融循环后仍满足设计要求，现场观测发现冻融作用主要影响表层5cm土壤，生态袋袋体和连接扣未见明显损伤。干旱条件下，2023年春季连续65天无有效降雨，土壤含水率降至8%以下，生态袋内的保水剂维持了最低限度的水分供应，70%的植被存活，雨季来临后植被迅速恢复，而普通植草护坡的植被死亡率达85%。地震工况振动台试验显示，在0.2g地震加速度作用下，生态袋边坡产生的附加位移仅为3.2mm，远小于刚性护坡的8.6mm，其柔性和分散性使其具有良好的抗震性能和冗余度。

（三）长期耐久性与维护成本分析

材料耐久性试验和现场检测为生态袋系统的长期性能提供了可靠依据。加速老化试验（相当于自然条件下50年）后，生态袋材料保持了68%的初始强度，仍高于设计强度要求，紫外线照射1000小时后表层材料略有粉化但不影响整体性能，生物降解试验显示年降解率低于0.5%。使用3年的生态袋样品现场检测显示，抗拉强度为4.1kN/m，保持了初始强度的91%，孔径从0.20mm增至0.23mm但仍在设计范围内，连接扣强度下降5%，连接可靠性良好，按此老化速率推算，生态袋系统的使用寿命可达40 ~ 50年。维护需求分析表明，前两年需要进行植被补植和施肥，年均费用8元/m²，第3 ~ 5年仅需简单修剪，费用降至3元/m²，5年后基本不需要人工维护，累计20年的维护成本仅为57元/m²，是混凝土护坡的19%。突发损坏的修复相对简单，局部生态袋破损可以单独更换，植被枯死区域可以补播种子，连接扣损坏可以现场更换，修复工作不需要专业设备，应急抢险时可快速堆砌形成临时防护。

（四）技术推广的工程适用性边界与建议

生态袋技术的适用条件和推广边界已通过大量工程实践得到

明确。坡度适用性方面，45° 以下边坡可直接使用生态袋，45° - 65° 需要辅助加筋措施，65° 以上建议采用复合防护；高度限制上，单级高度不宜超过10m，总高度超过30m应分级处理；地质条件方面，适用于土质边坡和强 - 中风化岩质边坡，新鲜基岩边坡需要预处理。气候适应性评估表明，年降雨量400 ~ 2000mm地区均可应用但需调整设计参数，温度 -20℃至45℃范围内材料性能稳定，湿润地区注意排水设计，干旱地区加强保水措施，高寒地区选用抗冻融材料和耐寒植物品种。不同工程类型的适配性分析显示，水电工程边坡防护效果最佳，可降低水土流失87%，公路铁路边坡需考虑振动影响加强连接措施，矿山生态修复可采用厚层生态袋提高基质厚度，城市河道护岸需考虑景观效果选择观赏植物。基于实践经验，建议在材料方面开发降解周期可控的生物基材料，结构方面研发模块化装配式系统，植被方面筛选乡

土植物建立区域化配置模式，监测方面开发智能监测系统实现实时预警。

四、结语

生态袋技术在水电工程边坡水土保持中展现出优异综合性能，实现了工程防护与生态修复的有机统一。18个月系统监测验证了该技术的显著效果：边坡最大位移12.8mm，系统稳定可靠；土壤侵蚀模数降低87.4%，达到轻度侵蚀标准；植被覆盖率达87%，形成稳定植物群落；径流系数降低57%；综合成本较传统护坡降低35%，维护成本仅为传统方式的28%。该技术为水电工程建设与生态环境保护协调发展提供了可行方案，不仅解决工程安全问题，还创造生态价值，具有广阔推广前景。

参考文献

- [1] 许龙辉. 水利水电工程边坡开挖及防护技术研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (引文版) 工程技术, 2024(12): 210-213.
[2] 李昂, 秦钊芮. 水利水电工程扰动区生态护坡技术比较研究 [J]. 水利水电快报, 2024, 45(2): 115-121.