

公路边坡生态防护：植物-工程复合技术的应用

杨东 格日娜 乔子睿

内蒙古自治区交通运输科学发展研究院 内蒙古 呼和浩特 010050

摘要：公路边坡生态防护是保障道路安全、维护生态环境的关键环节。植物-工程复合技术通过整合植物群落的生态功能与工程结构的力学性能，实现了边坡防护从单一功能向生态、安全、景观多维度协同的转变。本文系统梳理了植物-工程复合技术的内涵、分类体系及技术优势，结合典型工程案例探讨了技术实施要点与效果评估方法，并分析了技术应用中的关键问题与对策。研究表明，该技术可显著提升边坡稳定性，降低水土流失率，促进生物多样性恢复，为公路边坡生态修复提供了科学可行的解决方案。

关键词：公路边坡；生态防护；植物-工程复合技术；稳定性；水土保持

引言

公路建设作为国家基础设施建设的核心领域，其边坡稳定性直接影响道路运营安全与生态环境质量。传统边坡防护技术以刚性结构为主，如浆砌片石挡墙、混凝土喷锚、抗滑桩等，虽能有效控制边坡失稳，但存在生态破坏、景观割裂、后期维护成本高等问题。例如，浆砌片石挡墙会阻断土壤与水分的自然循环，导致边坡植被难以恢复；混凝土喷锚虽能快速固化坡面，但长期暴露易受风化侵蚀，且景观效果单一。随着生态文明理念的深入，生态防护技术逐渐成为行业研究热点^[1]。植物-工程复合技术通过整合植物群落的生态功能（如根系固土、茎叶减蚀、微气候调节）与工程结构的力学性能（如抗滑移、抗冲刷、结构支撑），实现了边坡防护与生态修复的协同优化，成为当前公路边坡治理的主流方向。

本文以植物-工程复合技术为研究对象，系统分析其技术内涵、分类体系及适用场景，结合典型工程案例探讨技术实施要点与效果评估方法，旨在为公路边坡生态修复提供理论支持与实践指导。

1 植物-工程复合技术的内涵与分类

1.1 技术内涵

植物-工程复合技术是指将植物群落与工程结构有机结合，通过植物根系固土、茎叶减蚀的生态功能，以及工程结构的力学支撑作用，形成“生物-工程”协同防护体系的技术模式。其核心在于：（1）功能互补性：植物群落提供生态服务功能（如水土保持、生物多样性恢复、景观美化），工程结构保障边坡稳定性（如抗滑移、抗冲刷）；（2）动态适应性：植物生长可适应边坡微环境变化（如光照、湿度、土壤类型），工程结构可抵御极端气候与地质灾害（如暴雨、地震、滑坡）；（3）可持续性：通过植物群落自然演替，实现边坡生态

系统的长期稳定，减少人工干预需求。

1.2 技术分类

根据工程结构的强度与植物群落的配置方式，植物-工程复合技术可分为以下三类：

1.2.1 坡面防护类复合技术

以柔性工程结构为主，结合浅层植物根系固土，适用于坡度较缓（一般 $\leq 30^\circ$ ）、岩土体稳定性较好的边坡。典型技术：（1）土工格室植草护坡：通过三维土工格室固定客土，形成蜂窝状结构，为植物生长提供稳定基质。例如，在泥岩边坡应用中，土工格室可增加坡面排水性能，减少雨水冲刷，同时格室结构可分散应力，防止坡面局部塌陷^[2]。（2）蜂巢式网格植草护坡：采用预制混凝土框砖拼铺形成蜂巢网格，内填种植土并栽植草种。该技术通过框砖分散雨水径流，减缓水流速度，适用于填方边坡防护，尤其适用于土质疏松、易冲刷区域。（3）液压喷播植草护坡：将草籽、肥料、粘合剂、保水剂等混合后，通过高压喷播设备均匀覆盖坡面。该技术施工速度快，适用于大面积边坡绿化，但需注意后期养护（如灌溉、补种）以防止水土流失，尤其适用于紧急绿化或临时防护场景。

1.2.2 坡面加固类复合技术

结合中等强度工程结构与深层植物根系，适用于坡度较陡（ $30^\circ-60^\circ$ ）、岩土体稳定性较差的边坡。典型技术：（1）客土植生植物护坡：将保水剂、粘合剂、植物纤维、有机肥等材料与客土混合，通过机械喷播形成一定厚度的植生层（通常8-15cm），再喷播草灌种子。该技术适用于岩基坡面、风化岩及硬质土砂地，如某矿山边坡修复工程中，通过客土喷播技术实现了50度坡面的植被覆盖，植生层与岩面结合紧密，有效防止了表层剥落。（2）三维植被网护坡：在坡面铺设三维植被网（通

常由聚乙烯或聚丙烯材料制成), 通过网孔固定客土并栽植植物。该技术可增强坡面抗冲刷能力, 适用于风化岩边坡及土壤贫瘠区域, 网体结构可保护植物幼苗免受雨水冲刷, 促进根系发育。(3) 石笼护坡: 采用镀锌钢丝石笼填充块石, 形成柔性防护结构, 结合石笼间隙栽植灌木或藤本植物。该技术兼具透水性与生态性, 适用于河道堤岸及冲刷严重边坡, 石笼结构可适应地基变形, 植物根系可进一步加固坡面。

1.2.3 边坡支挡类复合技术

技术特征: 以刚性工程结构为主, 结合植物群落生态修复, 适用于高陡边坡 ($> 60^\circ$) 或地质灾害频发区域 (如滑坡、崩塌)。典型技术: (1) 锚杆(索)+格构与骨架植草加固: 通过锚杆或锚索固定格构梁 (混凝土或钢筋混凝土结构), 形成整体支护结构, 再在格构内植草或栽植灌木。该技术结构强度高, 适用于失稳边坡加固, 如某高速公路高边坡治理中, 采用预应力锚索+混凝土格构梁, 结合植草绿化, 实现了边坡长期稳定, 格构梁可分散坡面应力, 防止局部破坏。(2) 生态混凝土护坡: 采用多孔混凝土块体 (孔隙率20%-30%) 拼铺坡面, 孔隙内填充种植土并栽植植物。该技术兼具结构强度与生态功能, 适用于河道堤岸及城市道路边坡, 混凝土块体可抵抗水流冲刷, 孔隙结构可为植物提供生长空间^[3]。(3) 三联生态防护技术: 集成物理防护 (固网锚杆+镀锌机编金属网)、抗蚀防护 (生物粘结配方材料) 与植被生态修复 (乔灌木复合群落) 三重措施, 形成自维持植被系统。该技术在某改扩建项目中应用后, 边坡植被覆盖率达95%以上, 水土流失量减少80%, 生物粘结材料可增强基材抗冲刷能力, 乔灌木复合群落可提升生态系统稳定性。

2 植物-工程复合技术的优势分析

2.1 生态效益显著

一是水土保持能力提升: 植物根系可固结土壤, 减少表土流失。例如, 客土喷播技术可使边坡土壤侵蚀模数降低至 $500t/(km^2 \cdot a)$ 以下, 远低于传统圪工防护的 $2000t/(km^2 \cdot a)$, 根系网络可拦截雨水, 减缓径流速度。二是生物多样性恢复: 复合技术通过构建多层次植物群落 (乔木、灌木、草本、藤本), 为昆虫、鸟类等提供栖息地。采用三维植被网护坡的边坡, 植物种类较传统防护增加3-5种, 昆虫多样性指数提升40%, 形成更复杂的食物链网络。三是微气候调节: 植物蒸腾作用可降低边坡表面温度, 缓解热岛效应。实测数据表明, 植被覆盖边坡夏季表面温度较裸露边坡低 $5-8^\circ C$, 减少混凝土结构因温差引起的开裂风险。

2.2 经济效益优化

一是全生命周期成本降低: 复合技术虽初期投资较传统防护高10%-20% (因材料与施工复杂度增加), 但后期维护成本可降低50%以上。例如, 三联生态防护技术通过微生物植生基材实现自养护, 无需人工灌溉与施肥, 减少长期运维投入。二是资源循环利用: 客土喷播技术可利用工程废土、秸秆、木屑等废弃物作为基材原料, 减少资源消耗。某矿山修复项目中, 通过回收利用废石土作为客土, 节约材料成本30%, 同时降低废弃物堆放对环境的影响。

2.3 社会效益突出

一是景观价值提升: 复合技术通过乔灌木立体配置, 形成四季有景的生态廊道。某高速公路边坡采用藤本植物+改良型厚层基材喷播技术后, 景观评分较传统防护提升60%, 增强道路美学价值与游客体验^[4]。二是安全风险降低: 工程结构与植物根系协同作用, 可提高边坡抗滑移能力。例如, 锚杆+格构植草技术可使边坡安全系数提升至1.3以上, 满足一级边坡防护标准 (通常要求安全系数 ≥ 1.25), 减少滑坡事故风险。

3 典型工程案例分析: 樟吉高速公路改扩建项目三联生态防护技术应用

3.1 工程背景

樟吉高速公路改扩建项目位于江西省, 全线需治理高陡边坡12处, 平均坡度 $45-60^\circ$, 原边坡采用浆砌片石防护, 存在生态破坏严重 (植被覆盖率不足10%)、景观效果差 (视觉单调)、排水不畅 (导致坡面积水) 等问题。项目采用三联生态防护技术, 旨在实现“平安百年品质工程”与“美绿高速”建设目标, 同时满足江西省“生态公路”建设要求。

3.2 技术实施

(1) 物理防护层: 采用 $\Phi 25mm$ 固网锚杆 (HRB400钢筋), 间距 $2m \times 2m$, 锚入深度3m (根据岩土体强度调整); 铺设镀锌机编金属网 (网孔 $8cm \times 8cm$, 丝径 $2.5mm$), 通过U型钉 ($L = 30cm$) 固定于坡面, 确保网体与坡面紧密贴合。(2) 抗蚀防护层: 喷播专有生物粘结配方材料 (含高吸水树脂、木质纤维、微生物菌剂、腐殖酸), 厚度5cm, 形成抗冲刷层。微生物菌剂可分解有机物, 促进植物根系生长; 高吸水树脂可吸收自身重量200倍的水分, 缓解干旱影响。(3) 植被生态修复层: 栽植乔灌木复合群落 (乔木: 香樟、杜英, 间距3m; 灌木: 胡枝子、紫穗槐, 间距1m; 草本: 狗牙根、白三叶, 播种量 $30g/m^2$), 配比为1:3:6, 形成立体植被系统。乔木提供遮荫, 灌木填充空间, 草本快速覆盖, 提

升生态系统稳定性。

3.3 实施效果

(1) 稳定性提升: 边坡安全系数由1.0提升至1.5(通过极限平衡法计算), 未发生滑移或坍塌, 监测数据显示坡面位移量小于5mm/年。(2) 生态恢复: 施工后6个月植被覆盖率达85%, 1年后形成稳定群落, 昆虫种类增加至20种以上(原为5种), 包括蜜蜂、蝴蝶等传粉昆虫。(3) 经济效益: 全生命周期成本较传统防护降低40%(20年周期), 减少混凝土用量1500m³/万m², 同时降低碳排放(因减少水泥生产)。

4 植物-工程复合技术应用的关键问题与对策

4.1 技术适用性选择

植物-工程复合技术要因地制宜。不同地质与气候条件, 需匹配差异化的技术方案。在湿润地区, 降水丰富, 液压喷播技术能快速将种子、肥料等混合物均匀喷播到坡面, 利于植被迅速覆盖, 防止水土流失。而干旱地区缺水, 需结合滴灌系统, 精准供水, 提高水资源利用率, 保障植物存活。岩质边坡坚硬、缺土, 客土喷播可将客土、种子等喷射到岩面, 形成植物生长基质; 石笼护坡通过石笼填充堆砌, 为植物提供空间, 增强边坡稳定性。土质边坡相对疏松, 土工格室或蜂巢式网格护坡能约束土壤, 防止滑移, 为植物生长营造稳定环境。

4.2 植物群落配置优化

遵循“适地适树”原则, 优先选用乡土物种。乡土物种适应本地气候、土壤等环境, 如酸性土壤边坡种马尾松、杜鹃等耐酸植物; 盐碱地边坡选怪柳、碱蓬等耐盐物种。同时, 构建乔灌草复合群落。乔木高大提供遮荫与栖息地, 灌木丰富群落层次, 草本生长快能快速覆盖地面、减少侵蚀。三者协同, 形成多层次、多功能生态系统, 提升稳定性。

4.3 长期监测与维护

建立“施工期-养护期-运营期”全生命周期监测体

系, 重点监测植被覆盖率、土壤侵蚀量、边坡位移等指标。例如, 三联生态防护技术中, 基材活性会随时间下降, 需定期补充微生物菌剂, 维持肥力和透气性。藤本植物生长快, 若不控制会过度蔓延, 影响其他植物生长与边坡美观, 需每年修剪, 把控其生长方向, 确保植物-工程复合技术长期有效发挥作用。

5 结语

植物-工程复合技术通过整合植物生态功能与工程力学性能, 实现了公路边坡防护的生态化、可持续化转型。典型工程案例表明, 该技术可显著提升边坡稳定性(安全系数提升30%-50%), 降低水土流失率, 促进生物多样性恢复, 具有显著的经济、生态与社会效益。未来研究需聚焦以下方向: 开发低成本、高强度的生态基材(如生物炭改性土壤、纳米粘合剂), 提升技术适用性; 结合物联网技术(如土壤湿度传感器、位移监测仪), 实现边坡稳定性实时预警与植被生长动态评估; 制定技术规范与验收标准(如《公路边坡生态防护技术指南》), 推动行业规范化发展。植物-工程复合技术是公路边坡生态修复的必然选择, 其推广应用将为交通基础设施与生态环境协调发展提供重要支撑, 助力“碳达峰、碳中和”目标实现。

参考文献

- [1]陈千华.公路路堤边坡生态防护设计及施工方法研究[J].工程建设与设计,2025,(11):102-105.
- [2]岳企哲.高速公路边坡生态防护技术研究[J].交通世界,2025,(07):109-111+122.
- [3]牛华平.公路路基边坡生态防护技术研究[J].汽车周刊,2025,(03):235-237.
- [4]湛晨斌.公路边坡生态防护设计研究[C]//广西网络安全和信息化联合会.2025年第二届工程领域数字化转型与新质生产力发展研究学术交流会议论文集.潮州市吴兴区交通工程质量安全管理中心,;2025:340-342.