

绿色低碳理念下公路边坡生态防护工程应用研究

陶少强

云南交投公建隧道工程有限公司 云南 昆明 650000

【摘要】：在交通基建绿色低碳转型的行业背景下，传统公路边坡硬质防护方式暴露出能耗较高、碳排总量偏大、生态损毁明显、景观适配性弱、服役耐久度不足等多项问题，无法适配现阶段双碳建设的发展标准。市面主流四类生态防护工艺结合工程固坡与植被修复优势，能够改善传统施工弊端。针对行业规范、低碳考评、养护管理、植被配置的现存短板落实优化方案，可有效提升公路边坡工程的低碳建设质量与生态修复成效。

【关键词】：绿色低碳；公路边坡；生态防护；工程应用；生态修复；低碳技术

DOI:10.12417/2705-0998.26.06.085

公路路网规模不断扩大，大量裸露边坡随之出现。土方开挖、路基填筑等施工活动破坏了原生生态结构，容易引发水土流失、边坡坍塌等地质灾害。传统硬质防护工艺虽注重结构稳固，但存在能耗高、碳排放量大、阻断生态循环等问题，与绿色交通发展要求不符。通过低碳生态防护技术对边坡进行治理，弥补施工环节的不足，完善施工与养护体系，已成为现阶段公路基建高质量发展的重点方向。

1 传统公路边坡防护模式存在的问题

1.1 碳排放高能耗大

传统硬质防护工程普遍选用水泥、块石、砂浆等重型建材开展施工作业，建材原料开采、工厂加工、现场浇筑全链条工序均会生成大量温室气体。各类施工设备持续消耗化石能源，叠加建材长途转运产生的能耗损耗，整体工程能耗长期处于高位，无法契合当前交通基建领域的低碳管控规范与“双碳”建设发展准则^[1]。

1.2 破坏生态系统

传统硬质护坡结构会全面覆盖公路边坡裸露土体，彻底封闭土壤内部孔隙结构，直接阻断土体水土流通、物质交换的固有通道。坡面原有微生物生存环境、植被生长基底遭到不可逆破坏，区域水土涵养、保土固坡的基础功能持续衰减，边坡原生生态结构逐步瓦解，彻底丧失自然调节、生态自愈的基础条件。图1传统硬质护坡结构破坏生态系统图。



图1 传统硬质护坡结构破坏生态系统图

1.3 景观协调性差

传统边坡硬质防护面层多为统一规整的硬化结构，视觉样式同质化严重，无法适配公路沿线多变的自然地貌与乡土景观风貌。人工硬化坡面会割裂山林、农田、水系之间的自然衔接关系，破坏道路廊道的整体视觉美感。现代公路基建兼具交通功能与公共服务属性，单调生硬的硬质护坡设计，严重降低道路景观适配度，大幅削弱工程配套的生态观感与人文服务价值。

1.4 耐久性有限

公路边坡硬质防护结构长期裸露于自然环境中，持续经受昼夜温差变化、雨水冲刷渗透、土体不均匀沉降等外力作用，极易滋生开裂、空鼓、脱落等结构性病害。工程服役周期内需频繁开展修补、加固等专项作业，反复施工不仅耗费大量人力与物资资源，持续消耗机械设备能源，显著提升工程全周期运维成本，还会叠加产生新增碳排放，制约项目低碳建设成效^[2]。

2 绿色低碳公路边坡生态防护技术及原理

2.1 客土喷播生态防护技术

客土喷播生态防护技术是现阶段公路边坡低碳修复领域应用范围较广、适配性能较强的新型护坡工艺，广泛适配公路工程常见的土质边坡、风化岩边坡、土石混合边坡等各类坡面工况，可有效解决裸露坡面水土流失、岩体风化剥落等工程问题。区别于浆砌片石、现浇混凝土等传统高碳护坡模式，该技术彻底舍弃重型高碳建材的批量使用，依托人工配比的生态基材完成坡面改造，整体施工模式贴合交通基建绿色化、低碳化的发展导向，能够适配不同区域、不同坡度的常规公路边坡治理工程，具备极强的工程普适性与推广价值。

该技术施工流程以生态基材调配、高压喷射成型为主，施工人员按需调配改良客土、生物有机肥、植被种源、功能性助剂复合型生态基材。其中改良客土可以优化坡面土壤结构，填补裸坡无土种植的空白；生物有机肥可以持续供给养分，保障植被长效生长；功能性助剂包含保水剂、粘合剂等材料，能够提升基材附着性与储水能力。整套施工工序依托轻型高压喷射

设备完成，大幅缩减大型机械的作业时长，有效降低施工阶段的燃油消耗、废气排放与扬尘污染，相较传统护坡工艺，可显著削减工程施工阶段的碳排放总量。

基材喷射成型后会在坡面形成厚度均匀、结构疏松的生态防护层，具备透气、透水、保肥的优良物理属性，可为草本、灌木植被种子提供稳定的萌发、生长环境。随着植被持续生长发育，植株根系会逐步穿透防护层深扎于原生边坡土体内部，与生态基材、坡面土体形成紧密结合的整体结构，稳步提升坡面固土防冲、抗滑稳固的能力。该技术依托人工基材改造与自然植被生长的复合模式，既可以实现边坡工程加固的基础目标，又可以持续修复坡面生态体系，实现公路边坡防护工程的低碳化、生态化长效运营。

2.2 生态袋防护技术

生态袋防护技术彻底摒弃混凝土、石材等高碳刚性建材的使用逻辑，依托柔性环保材料搭建护坡体系，打破传统硬质护坡高能耗、高污染、零生态的建设弊端。相较于常规护坡技术，该工艺的场地适配灵活度更高，可适配地形起伏较小的路段坡面改造，兼顾工程防护实效与区域生态保护需求，在低碳边坡治理工程中具备极高的普及价值。

该技术核心构件为抗老化、耐腐蚀、可自然降解的环保纤维布袋，施工人员按需装填腐殖土、改良种植土、乡土草灌种复合型生态基质，依托错缝堆叠、分层砌筑的标准化工序构筑整体柔性防护结构。为直观体现该技术的低碳优势，现将其与传统硬质护坡工艺的核心指标进行对比，具体如下表所示。

表 1 生态袋防护技术与传统硬质护坡工艺的比较

防护工艺	建材消耗	施工能耗	碳排降幅
生态袋防护	极低（无高碳建材）	轻型能耗	≥60%
传统硬质防护	大量水泥、石材	重型能耗	0%

整套施工流程无需大型机械持续作业，大幅简化施工工序、缩减作业周期，有效削减施工阶段的能源消耗与废气排放。生态袋成型结构具备良好的透水透气性能，不会封闭坡面土壤孔隙，能够持续涵养坡面水土资源。随着植被种子逐步萌发、生长，植株根系可穿透布袋纤维深入原生边坡土体，将分散的生态袋结构与坡面土体固结为整体，逐年提升边坡的抗滑、抗冲刷性能^[3]。同时，天然纤维材质的生态袋可缓慢降解，降解过程能够释放微量营养元素，持续滋养坡面植被，全程无建筑垃圾堆积，实现资源循环利用与边坡长效生态运维，深度契合公路工程绿色低碳的建设准则。

2.3 植被混凝土防护技术

植被混凝土防护技术可有效破解硬质裸岩无覆土、无植被生长载体的行业治理难题。常规生态防护技术难以适配岩体裸

露、坡度偏大的特殊坡面工况，传统刚性混凝土防护又存在高碳消耗、生态封锁的弊端，而该技术可以平衡工程安全、生态修复与低碳建设三类核心需求。其主要应用于风化岩质边坡、坚硬岩石挖方边坡等治理场景，能够适配 1:0.3 至 1:0.8 的高陡坡面，是目前岩质边坡低碳改造领域适配性极强的核心技术，有效填补了硬质裸坡生态化、低碳化治理的技术空白。

该技术摒弃传统混凝土高碱、高密度、高耗材的配比模式，重新优化原料组合体系，选用低碱度水泥、轻质多孔骨料、生态改良土、植物适配外加剂等环保原料，按科学比例调制可适配植被存活生长的生态混凝土浆料。低碱度的改良配方能够弱化传统混凝土的强碱属性，规避碱性环境抑制植物种子萌发、根系发育的问题。施工人员依托专业喷射设备，将均质浆料均匀喷涂于凹凸不平的岩质坡面，依托浆料附着性能贴合岩体表层成型，整体施工无需大量辅助建材，机械作业时长大幅缩减，可有效降低施工阶段的资源消耗与碳排总量。

浆料固化成型后会形成具备多孔结构的防护层，孔隙体系可以自主留存雨水水分、蓄积土壤养分、涵养原生微生物群落，为草本、灌木植被构建稳定的生存空间。待坡面植被逐步萌发成熟后，植株根系可穿插嵌入混凝土孔隙与岩体缝隙内部，实现植被、防护层、原生岩体的整体锚固，显著提升坡面抗滑移、抗冲刷的结构性能。

2.4 框架植草防护技术

框架植草防护技术的适配工况具备较强针对性，主要应用于土石混合边坡、固结性一般的土质挖方边坡以及坡度适中的填方边坡，可适配多数普通公路、高速公路的常规坡面治理场景^[4]。该技术结合边坡力学特性与生态修复需求开展结构优化，兼顾工程结构稳定性与坡面生态恢复性，适配绿色交通工程的建设发展要求。

设计人员通过缩减混凝土框架截面规格、合理拉大框架布设间距等优化方式，有效削减高碳建材的整体使用体量，相较传统全硬化框架工艺，可实现混凝土材料减量 30% 以上，大幅降低建材生产、运输及浇筑环节产生的碳排与能耗。框架成型后的镂空区域为生态改造核心区域，施工人员填充适配边坡生长的改良种植基质，优选本土草本、灌木植被种子完成混播种植，摒弃外来速生植被的滥用模式，从源头提升植被群落的环境适配性与存活稳定性。

整套防护体系依托刚性结构、柔性植被的协同模式实现双重防护效能，混凝土框架承担坡面应力分散、土体固结的核心作用，能够有效抵御边坡浅层滑移与不均匀沉降，保障坡面整体结构安全。框架内部生长的植被群落可持续发挥固土防冲、涵养水土、吸附粉尘的功能，植被根系交织固结坡面表层土体，弱化雨水径流对裸露坡面的冲刷侵蚀。随着植被逐步覆盖整个坡面，可有效弱化混凝土结构的硬质视觉观感，修复边坡生态

肌理,同时依托植被光合作用持续完成固碳释氧,逐步抵消施工阶段产生的微量碳排放。

3 绿色低碳公路边坡生态防护工程应用中存在的问题及优化对策

当前国内公路边坡生态防护工程仍处于迭代完善的发展阶段,实操落地环节存在有待优化的行业短板。现阶段交通基建行业尚未形成全国统一的标准化施工体系,一线作业的技术选型、基材调配等工作存在一定自主调整空间,施工规范性难以统一。行业内部缺少适配生态护坡工程的低碳量化考评机制,工程绿色建筑成效无法开展标准化核验。部分建设单位的管护理念相对传统,常态化养护工作推进力度不足,植被配置方案缺少针对性科学设计,致使各类生态防护工程的建设质量存在小幅差异。

交通基建行业需结合国内不同区域的地质特征、边坡工况与气候条件,持续完善边坡生态防护标准化建设体系。其中,云南区域山地广布、立体气候显著、地质构造复杂,行业机构可针对性细化适配云南高陡岩质边坡、土石混杂边坡的差异化施工细则,明确不同坡度、不同岩土质地边坡的技术选型标准、生态物料配比参数、标准化施工流程等专项内容,统一省内各地工程的作业规范与质量标准,有效约束一线施工的自主随意性,规范工程设计、现场施工、质量验收的全流程作业行为,从制度层面缩小各类生态护坡工程的建设质量差距^[5]。行业主

管部门可牵头搭建全周期碳排核算、低碳成效核验一体化评价机制,覆盖云南区域建材生产、现场施工、后期运维等全部建设阶段。相关单位可将能源节约效率、污染减排幅度、边坡生态固碳能力等核心低碳指标,正式纳入公路边坡工程的核心验收考评体系,改变传统工程重安全、轻低碳的评价短板,实现山地生态防护工程低碳成效的量化核验。建设单位需要转变传统管护思维,摒弃“重建轻管”的老旧建设模式,适配云南干湿季交替的气候特征,搭建分层化、常态化的坡面养护管护体系。工作人员可依据植被生长的阶段性特征,有序开展植被抚育、坡面检修、病害整治、杂草清理等实操工作,及时修复坡面植被退化、表层破损等问题,保障边坡植被群落的稳定发育。与此同时,技术人员需要持续优化边坡植被群落的整体配置模式,大力推广云南本土草本、灌木交叉混植的科学方案,依托行业技术创新持续迭代升级低碳防护工艺,不断优化生态护坡的适配性能与稳定性能,全方位提升山地公路边坡生态工程的安全稳定性与长期运营长效性。

4 结语

总之,低碳生态边坡防护技术能够兼顾工程安全、生态修复与碳减排,较好弥补了传统硬质防护模式的建设短板,符合现代公路工程的绿色发展需要。当前,生态防护在技术标准、低碳考核、养护管理等方面仍有不足。下一步应完善施工规范和运维机制,优化植被配置与技术工艺,推动公路边坡防护向低碳、长效、生态的方向稳步发展。

参考文献:

- [1] 杨东,格日娜,乔子睿.公路边坡生态防护:植物-工程复合技术的应用[J].工程施工与管理,2026,4(3).
- [2] 魏丕壹,魏书剑,乔攀举.基于生物工程措施的高速公路边坡生态防护体系构建与稳定性分析[J].产业创新研究,2025(3):132-134.
- [3] 张锐,李旺军,高乾丰,等.公路路基边坡生态防护技术研究综述[J].中外公路,2026,46(1):1-20.
- [4] 邹庆钰.生态环保理念下高速公路路基边坡防护与植被恢复技术优化[J].运输经理世界,2026(5):122-124.
- [5] 董璐.公路工程高边坡开挖及防护施工技术研究[J].运输经理世界,2026(3):13-15.