

公路路基边坡生态防护技术及其水土保持效应研究

江 旭

中交路桥南方工程有限公司 北京 100027

摘要：随着我国交通基础设施建设的快速发展，公路网不断延伸，大量路基边坡随之形成。传统工程防护措施虽能短期内稳定边坡，但存在成本高、景观效果差、生态功能缺失等问题。生态防护技术作为融合生态学、水土保持学与岩土工程的交叉领域，近年来在公路边坡治理中得到广泛应用。本文系统梳理了当前主流的公路路基边坡生态防护技术类型，包括植被护坡、三维植被网、植生袋、喷播绿化、生态混凝土及组合式生态防护体系等；深入分析其作用机理与适用条件；重点探讨各类技术在水土保持方面的效应，包括减少地表径流、增强土壤抗蚀性、改善微气候与生物多样性等。最后，针对当前生态防护技术存在的问题，提出优化方向与发展建议，以期对未来公路绿色建设与可持续发展提供理论支撑与实践指导。

关键词：公路路基；边坡防护；生态防护技术；水土保持；植被恢复

引言

公路建设是国家经济发展的重要支撑，但在山区、丘陵及黄土高原等生态脆弱区，大规模开挖填筑往往造成大量裸露边坡，破坏原有植被覆盖与土壤结构，极易引发水土流失、滑坡、泥石流等地质灾害，严重威胁公路运营安全与区域生态环境。据交通运输部统计，我国每年因边坡失稳和水土流失造成的公路养护与修复费用高达数十亿元。传统边坡防护多采用浆砌片石、混凝土挡墙、锚杆框架梁等硬质工程措施，虽具备较强的力学稳定性，但存在“灰色化”严重、生态功能缺失、后期维护困难等弊端。随着生态文明建设理念的深入，“绿色公路”“生态公路”成为新时代交通发展的核心要求。在此背景下，生态防护技术应运而生，其通过植被重建与工程措施相结合，不仅提升边坡稳定性，更实现水土保持、生态修复与景观美化多重目标。

1 公路路基边坡生态防护技术类型与机理

1.1 植被护坡技术

植被护坡是最基础、最经济的生态防护形式，主要通过根系固土、冠层截流、枯落物覆盖等机制发挥作用。常用植物包括狗牙根、高羊茅、紫穗槐、胡枝子等，具有根系发达、耐旱耐贫瘠、生长迅速等特点。作用机理包括：一是根系加筋作用：植物根系穿插于土壤孔隙中，形成天然“加筋网”，提高土体抗剪强度；二是冠层截留降雨：植被冠层可拦截部分降雨，减少雨滴对地表的直接冲击；三是枯落物缓冲层：凋落物覆盖地表，减缓径流速度，增加入渗。适用于坡度小于1:1.5、土质稳定、无严重冲刷的缓坡路段。

1.2 三维植被网（土工格室/土工网垫）技术

三维植被网技术是在传统植被护坡基础上引入高分子材料工程辅助的一种复合型生态防护方法。该技术通常采用聚丙烯等耐候性良好的合成材料制成具有立体网格结构的网垫或格室，铺设于坡面后填充改良种植土并播种适宜草种，从而形成“网-土-草”一体化的复合防护层。这种结构不仅能够有效固定表层土壤，防止种子和细颗粒在降雨初期被冲刷流失，还能显著提升土壤的持水能力和通气性，为种子萌发和幼苗生长创造有利微环境^[1]。更重要的是，三维网提供的立体空间有利于植物根系向纵深发展，增强根系对深层土体的锚固作用。实践表明，该技术在坡度介于1:1至1:0.75之间的中等坡度土质或风化岩边坡上表现尤为突出，既能满足短期抗冲刷需求，又能支持长期植被演替，是连接纯工程防护与纯生态恢复之间的重要过渡形式。

1.3 植生袋技术

植生袋技术是一种集结构支撑与生态恢复于一体的柔性边坡防护方法。其基本原理是将由可降解无纺布制成的袋体预先填充营养土、保水剂、缓释肥料及混合草灌种子，然后按照设计坡率堆叠于边坡表面，形成具有一定高度和稳定性的柔性挡墙。由于袋体本身具备一定的抗拉强度和透水性，可在施工初期有效抵抗雨水冲刷和浅层滑移，同时为植物提供初始生长基质。随着时间推移，袋体在自然环境中逐渐降解，其残留物融入土壤，不会造成二次污染，而内部生长出的植物根系则逐步承担起边坡稳定的主体功能。该技术施工便捷、适应性强，尤其适用于高填方路堤、桥台锥坡以及临时施工边坡等难以采用传统方法绿化的陡峭区域，坡度可达1:0.3甚至更陡。此外，通过合理配置灌木种子，还可实

现从一年生草本向多年生灌草群落的自然演替,提升生态系统的长期稳定性。

1.4 喷播绿化技术

喷播绿化技术是利用机械设备将种子、纤维、粘合剂、肥料、保水剂及土壤改良剂等按比例混合后,通过高压泵送系统均匀喷射至边坡表面,形成一层具有保水、固种和促生功能的覆盖层。根据基质厚度和应用场景的不同,可分为液压喷播、客土喷播和厚层基材喷播(TBS)三种主要形式。其中,液压喷播适用于土壤条件较好、坡度较缓的区域,操作简便、成本较低;客土喷播则针对岩石裸露、缺乏土壤的边坡,在表面喷覆5-10厘米的改良基质,为植物提供生存基础;而厚层基材喷播通过添加团粒剂和有机质,形成厚度达8-15厘米的稳定结构层,特别适用于坡度超过70°的高陡岩质边坡。该技术机械化程度高,覆盖均匀,成坪速度快,且可根据立地条件灵活调整配方,已成为复杂地质条件下生态修复的主流手段之一。

1.5 生态混凝土技术

生态混凝土技术是在传统混凝土材料基础上进行生态化改良,通过调控配合比或引入植生孔洞,使其在保持一定力学强度的同时具备透水、透气和植生功能。常见的形式包括多孔混凝土、植生混凝土砖以及植被型生态混凝土等^[2]。这类材料通常具有15%-30%的孔隙率,既可允许雨水下渗、减少地表径流,又可为耐湿植物提供生长空间。其抗冲刷能力强,特别适用于水流集中、冲刷严重的排水沟、急流槽及临水路基边坡。生态混凝土不仅解决了传统硬质护面“隔绝生态”的问题,还通过植物根系与多孔结构的协同作用,增强了边坡的整体稳定性与生态服务功能,实现了工程安全与生态效益的有机统一。

1.6 组合式生态防护体系

面对复杂多变的地质条件和多元化的防护需求,单一生态技术往往难以兼顾短期稳定性与长期生态恢复目标。因此,组合式生态防护体系应运而生,其核心思想是根据不同高程、坡度、岩土性质及水文特征,分区采用“上部生态+下部工程”或“多层次植被+结构支撑”的复合模式。例如,在边坡上部采用喷播绿化或三维网护坡以快速覆盖地表、控制浅层侵蚀,而在坡脚设置浆砌片石护脚或植生袋挡墙以抵抗集中水流冲刷;又如在锚杆框架梁形成的格构内填充植生袋或喷播基材,使刚性结构与柔性植被有机结合。此类体系不仅提升了整体防护效能,还通过乔灌草混交配置促进了生态系统的正向演替。实践证明,组合式防护是应对高陡、破碎、易

蚀等复杂边坡的有效策略,代表了生态防护技术向系统化、精细化发展的趋势。

2 生态防护技术的水土保持效应分析

2.1 减少地表径流与侵蚀

生态防护技术通过植被冠层、枯落物层及工程辅助结构的综合作用,显著削弱了降雨对地表的直接冲击力,并有效调控地表径流过程。植被冠层能够拦截部分降雨,降低雨滴动能,从而减轻溅蚀作用;地表覆盖的枯落物则形成天然缓冲层,延缓径流汇集速度,增加入渗时间。同时,三维植被网、植生袋等结构在坡面形成微地形起伏,进一步分散水流能量,抑制面蚀和细沟侵蚀的发生。大量野外监测数据表明,在植被覆盖度达到70%以上的生态护坡上,径流系数可比裸露边坡降低40%至60%,年均土壤流失量减少60%以上,充分体现了其在源头控制水土流失方面的显著成效。

2.2 增强土壤抗蚀性与抗冲性

生态防护不仅通过物理覆盖减少外部侵蚀力,更通过改善土壤内部结构提升其自身抗蚀能力。植物根系在生长过程中分泌有机胶结物质,促进土壤微团聚体的形成,增强土壤结构稳定性;密集根系网络如同天然加筋材料,显著提高土体的内摩擦角和粘聚力,使抗剪强度提升20%至50%。此外,喷播基材中添加的粘合剂和团粒剂也能在短期内形成稳定表层,抵抗初期降雨冲刷。生态混凝土的多孔结构则兼具滞沙与导渗功能,可有效拦截随径流迁移的泥沙颗粒,降低水流挟沙能力。这些机制共同作用,使边坡在遭遇强降雨时仍能保持较高的整体稳定性。

2.3 改善土壤水分与养分循环

生态防护体系通过植被—土壤—大气之间的物质与能量交换,重构了边坡微域的水肥循环机制。植物蒸腾作用调节局部小气候,降低土壤表面温度与蒸发速率;枯落物分解后释放氮、磷、钾等营养元素,持续补充土壤肥力;而根系活动则促进土壤微生物繁殖,加速有机质矿化与养分转化^[3]。同时,喷播基材中常掺入保水剂(如聚丙烯酰胺),可在干旱季节缓慢释放水分,缓解植物水分胁迫。这种良性循环不仅保障了植被的长期存活,还逐步改善了边坡土壤的理化性质,为更高层次的生态演替奠定基础。

2.4 促进生物多样性与生态系统恢复

生态防护的最终目标不仅是“绿起来”,更是“活起来”。通过合理配置乡土草本、灌木甚至小乔木,边坡逐渐从单一人工植被向结构复杂的植物群落演替,为昆虫、鸟类及小型哺乳动物提供栖息、觅食和迁徙通

道,从而提升区域生物多样性。例如,攀援植物如爬山虎可为鸟类提供隐蔽场所,豆科植物通过固氮作用改善土壤氮素状况,吸引特定传粉昆虫。这种生物互作关系的建立,标志着边坡从“工程对象”向“生态单元”的转变,真正实现了生态系统的自我维持与动态平衡。

2.5 长效性与自我维持能力

相较于传统工程措施“一次性投入、无后续功能”的局限性,生态防护体系具备显著的长效性与自我更新能力。一旦植被群落成功建立,便可通过种子扩散、根茎繁殖、匍匐茎延伸等方式自然扩展覆盖范围,无需频繁人工干预。多年生植物的持续生长还能不断加固深层土体,形成长期稳定的生态屏障。这种“一次建设、长期受益”的特性,不仅降低了全生命周期的养护成本,也契合了可持续发展的核心理念,是未来公路边坡治理的必然方向。

3 当前存在问题与挑战

尽管生态防护技术在实践中取得显著成效,但仍面临若干现实挑战。首先,部分地区在植物选型上缺乏科学依据,盲目引进外来观赏草种,导致夏季枯死或生态入侵,反而加剧边坡退化。其次,初期养护管理普遍薄弱,种子萌发期若缺乏灌溉、防践踏或病虫害防治措施,成活率难以保障。第三,行业缺乏统一的技术标准,不同地区、不同单位在基材配比、施工工艺、验收指标等方面差异较大,影响工程质量一致性^[4]。第四,多数项目仅关注1-2年的短期效果,缺乏对5年以上生态演替过程及水土保持效益的系统监测与评估。最后,生态技术初期投入通常高于传统工程,部分建设单位出于成本考量仍倾向于“重结构、轻生态”,制约了先进技术的推广应用。

4 优化路径与发展建议

4.1 科学选配乡土植物

应坚持“适地适树、近自然恢复”原则,优先选用本地适生、深根性、耐逆性强的乡土物种,避免盲目引种。通过构建乔—灌—草多层次复合配置模式,不仅可提升植被覆盖的时空连续性,还能增强生态系统的稳定性与抗干扰能力,为长期水土保持奠定生物基础。

4.2 推进标准化与智能化

亟需制定国家级《公路边坡生态防护技术规范》,

明确不同地质条件下的设计参数、施工流程、材料标准及验收方法。同时,积极推广智能灌溉系统、无人机精准播种、卫星遥感与地面传感器融合的生态监测平台,实现从“经验施工”向“数据驱动”的转型升级。

4.3 加强全生命周期评价

建立覆盖“设计—施工—养护—监测”全过程的管理体系,设立长期定位观测点,系统记录植被覆盖度、土壤理化性质、径流泥沙量等关键指标,量化生态防护的水土保持效益(如年均减沙量、碳汇增量等),为政策制定与技术优化提供科学依据。

4.4 创新融资与激励机制

建议将高标准生态防护纳入绿色金融支持范畴,对采用生态技术的项目给予财政补贴、税收减免或容积率奖励。同时,探索将边坡碳汇纳入生态补偿机制,激发建设单位主动采用生态方案的积极性。

4.5 推动多学科融合研究

未来应加强岩土工程、生态学、水文学、材料科学等领域的交叉协作,重点研发新型可降解植生材料、微生物促生菌剂、碳汇型边坡构建技术等前沿方向,推动生态防护从“功能恢复”向“价值创造”跃升。

5 结语

公路路基边坡生态防护技术是实现交通基础设施绿色转型的关键路径。通过植被重建与工程措施的有机结合,不仅能有效控制水土流失、提升边坡稳定性,还能恢复生态系统功能、美化路域环境。当前技术体系已较为成熟,但在植物配置、标准建设、长效管理等方面仍需完善。未来应坚持“因地制宜、生态优先、科技赋能”原则,推动生态防护从“被动治理”向“主动营造”转变,为建设美丽中国与交通强国提供坚实支撑。

参考文献

- [1]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.
- [2]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/OL].中外公路,1-21[2025-12-01].
- [3]白敬宁,胡明,曹士建,等.高速公路路基边坡加固技术与生态防护[J].汽车画刊,2024,(07):235-237.
- [4]管斐斐,孔定新,张清.公路路基边坡生态防护研究进展[J].科技资讯,2022,20(18):83-86.