

护坡植被根系固土效应及其对边坡稳定性的贡献分析

于安伟¹ 秦东海²

1. 连云港市赣榆区新沐河河道管理所 江苏 连云港 222100

2. 连云港市赣榆区通榆河北延送水工程管理所 江苏 连云港 222100

摘要: 随着全球气候变化加剧与人类工程活动频繁, 边坡失稳引发的滑坡、崩塌等地质灾害频发, 严重威胁人民生命财产安全与生态环境。传统工程护坡措施虽能提供短期稳定性, 但存在成本高、生态破坏大、景观协调性差等局限。在此背景下, 生态护坡技术因其环境友好、经济可持续及长期稳定性优势受到广泛关注。其中, 植被根系通过物理加筋、水文调节与生物化学作用显著提升边坡土体抗剪强度与整体稳定性。本文系统梳理了植被根系固土效应的作用机理, 重点分析其对边坡稳定性的贡献机制, 并结合典型植被类型与工程实践案例, 探讨影响根系固土效能的关键因素。最后, 针对当前研究中存在的不足, 提出未来在多尺度耦合模型构建、根-土界面动态演化机制及智能监测技术融合等方面的发展方向, 以期生态护坡工程的设计优化与推广应用提供理论支撑与实践指导。

关键词: 生态护坡; 植被根系; 固土效应; 边坡稳定性; 根系力学; 水文调节

引言

边坡是自然地貌与人工工程中普遍存在的地质体, 其稳定性直接关系到交通、水利、城市建设等基础设施的安全运行。据统计, 全球每年因边坡失稳造成的经济损失高达数百亿美元, 并伴随大量人员伤亡。传统护坡方法如混凝土挡墙、锚杆支护、格构梁等, 虽在短期内有效控制变形, 但往往割裂生态系统, 导致地表硬化、生物多样性下降, 且后期维护成本高昂。近年来, 随着“绿水青山就是金山银山”理念的深入贯彻, 生态护坡技术因其兼具工程防护与生态修复双重功能, 成为边坡治理的重要发展方向。植被作为生态护坡的核心要素, 其地上部分可通过冠层截留降雨、减缓地表径流, 而地下根系则通过复杂的物理-水文-生物过程增强土体结构稳定性。大量研究表明, 植被根系对浅层滑坡(深度通常小于2-3米)具有显著抑制作用。例如, 我国三峡库区多项监测证实, 植被覆盖率高的边坡滑坡发生率显著低于裸露坡面。然而, 植被根系如何具体影响土体力学行为? 其贡献能否量化? 不同植物种类、根系构型、土壤条件下的固土效能差异如何? 这些问题亟需系统研究。

1 植被根系固土效应的作用机理

植被根系对边坡土体的加固作用并非单一机制, 而是物理、水文与生物化学三类效应协同作用的结果。

1.1 物理加筋效应

根系嵌入土体后, 如同天然纤维或微型锚杆, 在土体受剪时承担部分拉应力, 从而提高整体抗剪强度。该效应主要体现在以下方面:

1.1.1 根系抗拉作用

当边坡发生潜在滑动时, 滑裂面上方的根系被拉伸, 产生抗拔力。根系提供的附加抗剪强度 $\Delta\tau$ 可表示为:

$$\Delta\tau = \frac{T_r}{A} \cdot \sin\theta$$

其中, T_r 为单位面积内所有根系的极限抗拉力总和, A 为滑裂面面积, θ 为根系与滑裂面法线的夹角。研究表明, 草本植物(如狗牙根、黑麦草)根系密集但较细, 适用于浅层加固; 灌木(如紫穗槐、胡枝子)根系粗壮且深扎, 可有效锚固中深层土体; 乔木(如松树、桉树)则通过主根与侧根网络形成三维加筋体系, 但需注意其高大冠幅可能增加风荷载风险。

1.1.2 根-土界面摩擦与咬合作用

根系表面粗糙度与土颗粒间产生摩擦阻力, 同时根系分支结构对周围土体形成“包裹”效应, 增强土体整体性。扫描电镜(SEM)观测显示, 根系周围常形成致密的“根鞘”结构, 显著提升局部密度。

1.2 水文调节效应

水分是诱发边坡失稳的关键驱动因子, 而植被根系在调控土体水分状态方面发挥着不可替代的作用。植物通过蒸腾作用持续从土壤中抽取水分, 并经由叶片气孔释放至大气, 形成稳定的水势梯度, 从而有效降低土体含水率, 提升有效应力与抗剪强度。一株成年乔木在生长旺季的日均蒸腾量可达100至200升, 在雨季可显著延缓地下水位上升速度, 减轻孔隙水压力累积。同时, 部分湿生植物如芦苇、香蒲具备发达的通气组织, 能在饱和土体中形成“生物排水通道”, 加速孔隙水消散; 即便在根系死亡腐烂后, 其遗留的微孔道亦可改善土体

渗透性能，促进雨水入参与排出^[1]。值得注意的是，尽管植被整体上有利于降低边坡含水量，但在极端暴雨事件中，若根系吸水与排水能力不足以应对瞬时强降雨输入，反而可能因吸胀作用导致局部土体软化，削弱稳定性。因此，植被的水文调节效应具有明显的时空依赖性，需结合区域气候特征与降雨模式进行科学选种与配置。

1.3 生物化学效应

除了物理与水文作用外，植被根系还通过分泌有机物质及促进微生物活动，对土体微观结构产生深远影响。根系在生长过程中会持续向周围土壤释放多糖、有机酸、酶类等分泌物，其中胞外多糖（EPS）具有强黏性，能够将分散的土壤颗粒胶结成稳定的团聚体，显著提高土体的凝聚力。实验研究表明，种植苜蓿的土样其凝聚力可比对照组提升15%至30%。此外，某些根际微生物（如尿素分解菌）在根系分泌物的诱导下，可催化生成碳酸钙晶体，填充土体孔隙并胶结石英颗粒，这一过程被称为微生物诱导碳酸钙沉淀（MICP），已在砂土加固中展现出良好应用前景^[2]。长期来看，根系死亡后的腐解过程还会转化为腐殖质，不仅改善土壤结构与持水能力，还持续提升土壤肥力，为植被群落的稳定演替创造有利条件。这些生物化学过程虽作用缓慢，但具有累积性和持久性，是生态护坡长期稳定的重要保障。

2 根系固土效应对边坡稳定性的贡献分析

边坡稳定性通常以安全系数 F_s 衡量，定义为抗滑力

矩与滑动力矩之比。引入植被后， F_s 的提升主要源于抗剪强度参数（粘聚力 c 与内摩擦角 ϕ 的增加及孔隙水压力 u 的降低。

2.1 定量评估方法

目前常用方法包括极限平衡法（LEM）、有限元法（FEM）及离散元法（DEM）。

2.1.1 极限平衡法改进

在Bishop、Janbu或Morgenstern-Price等模型中，将根系附加抗剪强度 $\Delta\tau$ 作为等效粘聚力增量纳入计算。例如：

$$c_{veg} = c_0 + \Delta\tau$$

其中 c_0 为原状土粘聚力。该方法简便，适用于初步设计。

2.1.2 数值模拟耦合

采用FEM软件（如PLAXIS、GeoStudio）建立根-土耦合模型，将根系视为嵌入式梁单元或采用等效均质化方法。近年来，基于X射线CT扫描的三维根系重构技术为高精度建模提供数据支持。

2.1.3 现场监测与反演

通过安装孔隙水压力计、倾斜仪及应变片，结合降雨事件监测边坡响应，反演植被的实际加固效果。例如，意大利Albaredo滑坡监测网显示，植被覆盖区孔隙水压力峰值比裸地区低30%–50%。

2.2 典型植被类型的固土效能对比

表1：典型植被类型的固土效能对比

植被类型	根系特征	适用坡度	固土深度 (m)	主要贡献机制
草本（狗牙根、高羊茅）	密集须根，浅层分布	< 30°	0.3–0.8	物理加筋（表层）、水土保持
灌木（紫穗槐、火棘）	主根+侧根，深达1–2m	30°–45°	0.8–2.0	物理加筋（中层）、蒸腾耗水
乔木（马尾松、刺槐）	主根深扎，侧根广布	< 35°（需防风）	1.5–4.0+	深层锚固、强蒸腾
藤本（爬山虎、常春藤）	吸盘/不定根附着	垂直岩壁	表层覆盖	防冲刷、抑制风化

需强调，混合种植（草-灌-乔复合系统）往往优于单一物种，因其根系在垂直与水平方向形成多层次网络，实现全剖面加固。

2.3 工程实践案例分析

在三峡库区秭归县某公路边坡治理中，原采用浆砌片石护面，但三年后出现结构性裂缝。改造方案清除旧结构，改种紫穗槐与狗牙根混播组合^[3]。经过三年监测，边坡未再出现新增变形，雨季孔隙水压力显著降低约40%，边坡安全系数由初始的1.05提升至1.32，达到稳定标准。另一典型案例位于浙江杭新景高速公路，该路段采用“三维土工网垫+喷播草籽+藤本植物”的复合生态护坡技术。土工网垫为初期植被定植提供支撑，草本快

速覆盖地表，藤本植物则沿坡面攀援形成绿色屏障。五年运行数据显示，植被覆盖率长期维持在90%以上，边坡未发生任何滑坡或冲沟现象，抗冲刷能力较传统护面提升三倍以上。这些成功案例不仅证明了植被根系在提升边坡稳定性方面的有效性，也展示了生态护坡在景观美化、生物多样性保护等方面的附加价值。

3 影响根系固土效能的关键因素

尽管植被护坡优势显著，但其实际效能受到多种因素的综合制约，需在设计与实施中予以充分考量。

3.1 植物生物学特性

植物自身的生物学特性是决定其固土能力的基础。根系形态直接影响加固深度与方式：直根系植物（如豆

科)主根深扎,适合深层锚固;须根系植物(如禾本科)根系密集但浅层分布,擅长表层固结。此外,植物的生长速率与寿命也至关重要——速生植物虽能快速形成覆盖,但寿命较短,需通过轮作或混播实现功能延续;而慢生但长寿的物种则更适合长期稳定需求。抗逆性同样是关键指标,只有具备较强耐旱、耐贫瘠、抗病虫害能力的植物,才能在恶劣边坡环境中存活并持续发挥固土作用。

3.2 土壤与地形条件

边坡的土壤性质与地形特征深刻影响植被的定植与根系发育。在砂质土壤中,根系易于扩展但缺乏有效胶结,固土效果有限;而在黏性土中,虽然保水性好、凝聚力高,但土壤紧实度可能限制根系穿透。坡度决定了重力作用强度与植物定植难度,一般而言,坡度越大,植被存活率越低,对植物选择的要求越高。坡向则通过影响光照、蒸发与温度间接作用于植被生长——阳坡光照充足但蒸发强烈,阴坡则相反^[4]。此外,对于已处于临界失稳状态的边坡,单纯依赖植被难以奏效,必须先进行必要的工程加固,再辅以生态措施,实现“先稳后绿”。

3.3 气候与水文环境

区域气候与水文条件是植被护坡成败的外部决定因素。在降雨集中且强度高的地区,若植被蒸腾与排水能力不足以应对短历时暴雨,可能导致孔隙水压力骤升,反而诱发滑坡。相反,在干旱频发区域,长期缺水会导致根系干枯死亡,丧失加固功能。冻融循环在寒冷地区亦构成挑战,反复冻结与融化可破坏根-土界面结构,降低根系锚固力。因此,植被选型必须紧密结合当地气候特征,优先选择适应性强、功能匹配的乡土物种。

3.4 人为管理措施

科学的人为干预是保障植被护坡长期有效的关键。在播种或栽植初期,需进行必要的灌溉、施肥与防践踏保护,确保幼苗成活。生长过程中,定期修剪可刺激分蘖,增加根系密度;适时补植可弥补局部死亡造成的功能空缺。此外,病虫害防治不容忽视,一旦发生大面积植被死亡,不仅丧失固土功能,还可能因腐烂根系产生负压或气体,进一步削弱边坡稳定性。因此,建立长效养护机制,是生态护坡从“建成”走向“长效”的必要保障。

4 研究挑战与未来展望

尽管植被护坡研究已取得显著进展,但仍面临若干深层次挑战。首先,根-土相互作用的多尺度建模仍显

不足,现有模型多将复杂根系简化为均质材料,难以真实反映其三维构型、非线性力学行为及与土体的动态耦合过程。未来亟需融合高分辨率成像技术(如Micro-CT)、机器学习算法与多物理场数值模拟,构建“根系构型—力学响应—水文过程”一体化的精细化模型。其次,根系固土效能具有显著的时效性,随季节更替、植物年龄增长而动态演化,但目前对这一动态过程的认知仍较模糊。发展基于分布式光纤传感、无人机LiDAR等技术的长期原位监测体系,将有助于建立时效性评价与预测模型。第三,在全球气候变化背景下,极端降雨与干旱事件频发,如何筛选或通过基因编辑培育出兼具高固土能力与强抗逆性的“超级护坡植物”,成为新兴研究方向。第四,当前生态护坡设计多依赖经验,缺乏统一的量化标准与设计规范,建议构建涵盖植物、土壤、气候等多维参数的数据库,并开发智能化选型与设计平台。最后,未来的生态护坡应走向“植物+土工合成材料+微生物”的多元复合系统,通过功能互补与风险分散,实现更高水平的安全性与生态效益。

5 结语

植被根系通过物理加筋、水文调节与生物化学三重机制,显著提升边坡土体的抗剪强度与整体稳定性,尤其对浅层滑坡具有高效防控作用。其贡献可量化体现为安全系数的提升,且在合理选种与科学管理下,生态护坡兼具经济性、可持续性与景观价值。然而,根系固土效能受植物特性、环境条件与人为干预多重影响,需因地制宜、系统设计。未来研究应聚焦多尺度机理揭示、动态监测技术发展与创新,推动生态护坡从“经验应用”迈向“精准调控”,为国家生态安全与防灾减灾体系建设提供坚实支撑。

参考文献

- [1]牛小云,郭爽,周健,等.大广高速不同护坡植被土壤微生物及理化性质[J].应用与环境生物学报,2018,24(04):758-765.
- [2]许英姿,朱乔生,黄效.基于熵值法的南宁市膨胀土护坡植被根系特征指标评价[J].水土保持通报,2022,42(02):189-194.
- [3]李明鑫.典型护坡植被对三峡库区野猫面滑坡的固土抗蚀效应研究[D].三峡大学,2023.
- [4]王明涛,高国荣,苗彦军,等.拉林公路生态袋护坡植被和土壤现状及关联性研究[J].中国草地学报,2023,45(04):67-73+89.