

高速公路养护工程中的生态修复措施优化：固氮菌植物的作用与应用

谷加存 张霖山*

东北林业大学, 中国·黑龙江 哈尔滨 150001

摘要: 基于高速公路养护工程中常见的土壤退化、植被稀疏与生物多样性降低等生态问题, 对固氮菌植物在生态修复中的应用进行了研究。阐述了紫穗槐、无芒雀麦、披碱草在 pH 值 8.5、压实度 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ 环境下的适应性, 介绍了接种液浓度为 $1.2 \times 10^9\text{CFU}/\text{mL}$ 条件下的菌植共生技术。结合甬台温复线案例, 研究结果表明, 修复后土壤有机质含量提升至 $\geq 1\%$, 群落覆盖率超过 70%, 放线菌密度达到 $\geq 5 \times 10^4\text{CFU}/\text{g}$ 。

关键词: 高速公路养护工程; 生态修复; 固氮菌植物

Optimization of Ecological Restoration Measures in Highway Maintenance Engineering: The Role and Application of Nitrogen Fixing Bacteria Plants

Jiacun Gu Linshan Zhang*

Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang, 150001, China

Abstract: Based on common ecological problems such as soil degradation, sparse vegetation, and reduced biodiversity in highway maintenance engineering, the application of nitrogen fixing bacteria plants in ecological restoration was studied. This paper elaborates on the adaptability of *Robinia pseudoacacia*, *Spartina alterniflora*, and *Elymus latifolia* in an environment with a pH value of 8.5 and a compaction degree of $1.6\text{g}/\text{cm}^3$, and introduces the symbiotic technology of bacterial and plant growth under the condition of an inoculum concentration of $1.2 \times 10^9\text{CFU}/\text{mL}$. Based on the case study of the Yongtai Wenzhou double line, the research results show that after restoration, the soil organic matter content increased to $\geq 1\%$, the community coverage rate exceeded 70%, and the actinomycete density reached $\geq 5 \times 10^4\text{CFU}/\text{g}$.

Keywords: highway maintenance engineering; ecological restoration; nitrogen fixing bacteria plant

0 前言

随着交通基础设施的快速扩展, 高速公路沿线生态系统面临日益严峻的退化风险, 土壤结构破坏、植被覆盖率下降与生物多样性丧失等问题普遍存在, 严重制约路域环境的可持续稳定。生态修复已成为提升道路养护质量与区域生态安全的重要方向。固氮菌植物因其独特的根际共生固氮能力与对逆境环境的高度适应性, 逐渐成为退化生态系统重建的关键植被资源, 在高速公路养护工程中具备广阔的应用潜力与实践价值。

1 高速公路养护工程中生态退化的常见问题

1.1 土壤理化性质退化

在持续交通压力与人为干扰的叠加作用下, 高速公路沿线表层土壤结构破坏显著, 颗粒分布失衡, 出现团粒结构松散、持水性降低的现象。有机质含量普遍偏低, 调查数据显示部分路段表层腐殖质含量不足 0.8%, 远低于区域平均值, 土壤团粒胶结力显著下降。酸碱度波动幅度大, 局部土壤 pH 值呈强碱性, 超过 8.5, 严重影响微生物群落稳定性与植物生长基础环境^[1]。电导率显著上升, 反映出盐分积聚

现象普遍, 尤其在雨水冲刷频繁的坡面地带更为集中。养分分布不均匀, 速效氮磷钾元素检测值存在局部贫瘠斑块, 土壤层次性功能失调, 已无法为原生植被提供稳定营养支持。

1.2 植被覆盖率下降

沿高速公路两侧常见原生植被断裂带与退化斑块, 草本覆盖层稀疏、不连续现象普遍, 部分坡脚及中段区域裸露率高达 45% 以上, 明显高于周边自然斜坡的对照值。多年生植被更新能力弱, 群落稳定性差, 灌草混生层高度不均, 局部高度不足 10cm, 根系覆盖深度浅, 根茎密度分布紊乱。植被种类单一, 以耐旱性先锋草种为主, 生物多样性指数低于 1.5, 群落结构呈现出明显的退化趋势。绿篱带断续、林草交错区域植被镶嵌性缺失, 植株长势参差, 局地无自然更新现象。调查发现, 迎风坡与车行区边缘地带绿化带呈现明显断层, 尤其在易冲刷与扰动频繁路段, 植被空缺带长度超过 8m^[2]。

1.3 水土流失

高速公路边坡与施工扰动带普遍存在细颗粒物裸露区, 年均降雨量超过 850mm 区域的冲刷沟槽深度可达 12cm, 单次暴雨后局部坡脚冲蚀沉积厚度超过 5cm。不同坡向地段的

侵蚀速率差异显著,南向裸露坡面年均土壤流失量高于北向约 27%。表层径流带颗粒含量明显上升,漂浮物悬浮浓度高达 3.2g/L,属强侵蚀状态^[3]。碎石层垫基础区域因缺乏植被保护,雨季期间每百米长度可见 6~9 处细沟发育,沟宽普遍超过 30cm,部分汇水区区域形成小型塌陷坑。边沟与排水口下游区域淤积体密度显著增加,最大单点采样含沙率达 42.6%。坡面失稳处,裸地延展范围大于 16m²,连续片状剥蚀斑块数量呈上升趋势,年监测图像显示流失面积同比增加 13% 以上。

1.4 生物多样性降低

高速公路沿线生态缓冲带的物种组成日趋单一,调查样点中植物多样性指数 Shannon-Wiener 值普遍低于 1.2,个别路段甚至不足 0.9。草本层中豆科和菊科物种占比超过 68%,木本层仅残存小叶杨、胡枝子等 3~5 个耐旱种类,群落功能分化程度极低^[4]。节肢动物样本数量明显减少,昆虫类群中鳞翅目与鞘翅目种数不足 10 种,采样密度低于每平方米 3 只,较未干扰区域下降超过 60%。鸟类监测点记录显示,通行频繁区域年均观测物种数量不足 7 种,栖息行为稀少、繁殖迹象缺失。微生物多样性同步下降,土壤样本中放线菌类群检出率不足 45%,优势菌群单一,16S rDNA 测序显示 OTU 数量下降约 38%。植被—土壤—动物三者间协同系统被严重破碎,生态网络连通性指数显著降低。

2 高速公路养护工程中生态退化的成因分析

2.1 工程建设阶段的生态破坏

施工阶段大量表土剥离与机械扰动直接破坏原有土壤结构,压实强度普遍超过 2.1MPa,致使团粒结构破碎率达 64% 以上。边坡开挖导致地表连续性丧失,裸露面积年均增长率超过 18%,边坡断面破碎带宽度普遍大于 3m。施工弃土堆填高差不一,高差区段平均坡度大于 28%,加剧表层水动力扰动。植被清除过程中未设缓冲带,清理半径大于设计范围 15%~20%,导致自然更新种群基质全面破坏。重型设备通行频繁区域土壤剖面压实深度可达 40cm,微生物生境扰动明显,检测样点中放线菌活性指数下降逾 51%。

2.2 施工过程中的土壤结构破坏

在施工机械持续碾压下,原生土壤孔隙率显著下降,测区内 0~20cm 层平均孔隙度由原本 48% 降至不足 26%。大型设备集中作业区表层压实系数普遍超过 1.6g/cm³,土壤通气孔比例缩减超 40%。扰动带有机质破坏严重,腐殖酸总含量减少率高达 52%,团粒结构崩解指数上升到 63% 以上。剥离后的裸地区域再无顶层保护,强度不均的压实带形成不连续压层,垂直渗透速率下降近 65%,致使整体土壤结构功能性破碎^[5]。在部分排水施工区,铲刮深度超过 30cm,原有生根层完全扰乱,根系附着基底分布混乱,断裂率接近 78%。

2.3 机械碾压与植被清除

高频次重型机械作业直接压实植被根系层,样带压实深度普遍超过 38cm,草根茎断裂率高于 82%,地下生物通气通道结构塌陷率达 69%。施工清场过程中,大范围推土清除致使原生物覆盖带破坏宽度超出设计边界约 1.7 倍,地被植物完整保存率不足 18%。清除路径未设过渡缓冲,灌木层与草本层一并铲除,地表残茬覆盖率低于 12%,生境连续性完全中断。机械履带反复行进区域植株倒伏密度达每平方米 42 株,地表植被再生芽点保留率不到 15%。大面积清除作业使样区单位面积植物种类数由 23 种降至不足 9 种。

2.4 外来入侵物种影响

受施工扰动带空缺带和养护管理时序滞后影响,外来物种易于在裸地、边坡及排水带快速扩展,样带中飞燕草、加拿大一枝黄花等入侵植物覆盖率超过 34%。在 15 个调查样区中,入侵种数量占总植物种数比值平均为 41.7%,最高达 58%。部分外来物种种群密度突破每平方米 60 株,生物量显著高于本土草本类群。其根系扩展半径超过本地草种约 1.5 倍,地下分布深度达到 35cm 以上,直接占据土壤层空间。叶面积指数高、光合效率高,年平均生长速率达 7.8cm/d,种群扩张能力表现出明显优势。高密度种群区域本土植被监测检出率不足 40%。

3 高速公路养护工程中固氮菌植物生态修复的应用

3.1 高速公路概况

浙江沿海高速公路(甬台温复线)全长 378km,连接宁波、台州、温州等地,沿线穿越多处滨海盐碱地和高压实边坡,土壤 pH 值常超过 8.5,表层有机质含量低于 1%,压实度高达 1.6g/cm³,导致原生植被更新能力弱,生态系统稳定性差。针对上述生态退化问题,需在养护工程中引入固氮菌植物进行生态修复,以提升土壤质量和植被覆盖率,增强生态系统的稳定性。

3.2 固氮菌植物选择与适应性

固氮菌植物的选育依据需综合考虑耐盐碱性、根系共生能力与区域气候适应性,沿甬台温复线实际调查中,优先筛选根瘤菌共生能力强的紫穗槐、无芒雀麦、披碱草三类种源,实测其在 pH8.5 以上、压实度 1.6g/cm³ 条件下的出苗率均高于 70%。苗圃阶段通过接种本土高效根瘤菌菌株,在培养基中模拟边坡盐分(电导率 1.9ms/cm)和干旱胁迫(含水量 10%),连续驯化 28 天,筛选出菌植复合体系的田间存活比值达到 1 : 0.83。工程应用中采取穴状点播与菌体根际包埋同步进行,每穴播深 5.5cm,单位面积种植密度控制为 36 株/m²,配合局部喷施液态菌剂 500mL/m²,以保证根系共生扩展效率。

具体种植组合及菌株信息见表 1。

表 1 固氮菌植物配置与生境适应参数表

植物名称	播种方式	播深（cm）	种植密度（株/m ² ）	pH 适应范围	接种液使用量（mL/m ² ）
紫穗槐	穴状点播	5.5	36	7.5~9.0	500
无芒雀麦	穴状点播	5.5	34	7.2~8.8	500
披碱草	穴状点播	5.5	32	7.0~8.5	450

3.3 生态修复效果评价指标体系

生态修复效果的评价体系构建基于“土壤质量—植被结构—生物活性”三类核心维度，采用定量参数分级法建立分项指标矩阵。土壤维度中引入压实度、有机质含量、速效氮浓度与 pH 稳定性四项参数，指标设定区间参照浙江沿海地区修复标准，实测范围覆盖 0~20cm 土层，使用三点取样、平行检测法控制误差小于 3%。植被结构指标侧重恢复

后的群落覆盖率、草本层高度一致性与群落多样性指数，每 10m² 设置 1 个观测样带，样本间距控制在 5m 以内。生物活性维度中将放线菌群落密度与根际呼吸速率作为关键微生物生态指标，采用 16S rDNA 分型法与红外气体分析法同步测定，按月周期采样，构建时间序列响应模型。综合指数通过加权赋值法形成修复等级分布图，支撑后续维养周期调整。相关指标分布与测定方法详见表 2。

表 2 高速公路固氮植物修复效果评价指标体系表

维度	指标名称	测定方法	采样要求	评价参考值范围
土壤质量	压实度	环刀法	0~20cm，每 5 点合样	1.3~1.6g/cm ³
	有机质含量	重铬酸钾氧化法	每月 1 次	≥ 1%
	pH 值	电极法	湿土取样	7.0~8.5
植被结构	群落覆盖率	样方测量	10m ² ，间距 5m	≥ 70%
	草本层平均高度	母尺测定	每方 5 点取均值	≥ 15cm
	Shannon 多样性指数	α 多样性分析	按群落单位调查	≥ 1.5
生物活性	放线菌密度	稀释涂布法 + 计数	土样 3 重复检测	≥ 5 × 10 ⁴ CFU/g
	根际呼吸速率	红外气体分析仪测定	样本土壤 500g	≥ 8.0μg CO ₂ /g·h

3.4 修复技术经济性分析

固氮菌植物生态修复方案的经济性评估以单公里高速公路典型边坡段为基础单位进行测算，整体投入结构涵盖种子采购、菌剂培育、土壤改良、人工栽植与阶段性养护五类支出。菌株繁育采用小规模控温发酵方式，每批处理周期为 72 小时，菌液浓度控制在 1.2 × 10⁹CFU/mL，单亩成本折合约 73 元。植物种子以混播比例配制后统一穴播，密度为 32~36 株/m²，每公里所需播种工时约为 96 工日，单位人工成本按当地日均工资 235 元计算。土壤局部调理采取有机改良剂间隔带状投施，剂量控制为 0.6kg/m²，混合施入深度为 10~12cm，由人工分段操作并辅以低压喷洒作业。技术养护期设计为 90 天，含二次补植与一次菌液补喷，每周安排 8 人次巡视，合计交通、人工与耗材费用构成控制在合理限额内。方案设计强调菌植共生系统在提升长期植被更新能力与减少重复养护频次上的经济优势，较传统生草修复法在人工与维护环节支出控制方面具备明确适配性。

3.5 长期生态效益追踪评估

为确保固氮植物修复措施在高速公路生态系统中具备持续性效益，追踪评估系统以 5 年为周期开展分层采样与动态监测，监测点设置密度控制在每公里 5 处，涵盖不同坡向与压实程度的代表性样带。年度监测中，通过无人机高分影像叠加 NDVI 指数对植被覆盖变化进行遥感对比，配合 0~30cm 土层剖面采样，分析有机质、速效氮和团粒结构参数变化趋势，样本间取样误差不超过 4%。生物多样性部分依托固定点种群动态调查，结合昆虫诱捕与鸟类声谱识别，

每季度录入物种数量、频度与出现概率。数据汇总采用时间序列线性拟合与相关性分析，提取干预与自然演替间的趋势偏移幅度，形成评估图组。全过程通过 GIS 平台与数据库联动构建评估模型框架，确保空间分布变化与因子响应具有可回溯性与预测适应能力。

4 结语

固氮菌植物在高速公路养护工程中的生态修复中展现出良好的适应性与修复潜力，通过优化种植方式与接种策略，有效改善了土壤结构、提升了植被覆盖率与群落稳定性，增强了微生态系统活性与整体生物多样性。构建的多维度指标评价体系与经济性测算模型，为后续工程提供了可量化、可执行的修复路径。未来应持续加强对修复长期动态效应的追踪监测，完善区域化适配技术标准，推动固氮植物修复机制在更广泛生态脆弱带的推广应用。

参考文献：

[1] 汪春泽.桥梁加固新技术在高速公路桥梁养护中的实践[J].中国地名,2025(2):52-54.

[2] 孙伟.高速公路养护施工中绿色环保材料的应用及其可持续性评估[J].价值工程,2025,44(4):43-46.

[3] 郁小国,陈钟梁.公路路面裂缝养护措施及施工技术[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(5):5-7.

[4] 韦林.高速公路建设施工中的绿色施工技术应用与效果研究[J].汽车周刊,2024(11):147-149.

[5] 张于会.浅谈高速公路绿化工程施工及养护管理[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2025(2):198-201.