

Study on the mechanism of soil fixation by plant root system and its application in soil and water conservation

Baojun Zhang¹ Ya Tu²

1. Helan Mountain National Nature Reserve Administration, Alashan League, Inner Mongolia, Alashan, Inner Mongolia, 750300, China

2. Alashan Left Banner Agricultural and Animal Husbandry Comprehensive Administrative Law Enforcement Team, Alashan, Inner Mongolia, 750300, China

Abstract

This study focuses on the physical and ecological mechanisms of soil stabilization by plant roots, systematically analyzing how root systems enhance soil erosion resistance and their application in soil and water conservation. The research examines three aspects: the mechanical effects of roots, soil improvement, and community synergy. It explores how roots improve soil stability through network consolidation, biochemical improvement, and microhabitat creation, proposing a configuration paradigm for soil and water conservation based on 'site conditions-root characteristics-functional needs.' The study indicates that to scientifically utilize the soil-stabilizing function of plant roots, it is essential to consider regional ecological features and vegetation adaptability, achieving optimal soil and water conservation efficiency through species selection, community construction, and dynamic management. This provides theoretical guidance for ecological restoration and soil and water conservation projects.

Keywords

plant root system; soil stabilization mechanism; soil and water conservation; root mechanics; ecological restoration

植物根系固土机理及其在水土保持中的应用研究

张宝军¹ 图雅²

1. 内蒙古贺兰山国家级自然保护区管理局, 中国·内蒙古阿拉善盟 750300

2. 阿拉善左旗农牧业综合行政执法大队, 中国·内蒙古阿拉善盟 750300

摘要

本研究聚焦植物根系固土的物理与生态机理, 系统分析根系对土壤抗侵蚀能力的影响机制及其在水土保持中的应用路径。研究从根系力学效应、土壤改良作用及群落协同机制三方面, 剖析根系如何通过网络固持、生物化学改良及微生境营造提升土壤稳定性, 提出基于“立地条件-根系特性-功能需求”的水土保持配置范式。研究表明, 科学利用植物根系的固土功能, 需结合区域生态特征与植被适应性, 通过物种筛选、群落构建及动态管理实现水土保持效能的最大化, 为生态修复与水土保持工程提供理论参考。

关键词

植物根系; 固土机理; 水土保持; 根系力学; 生态修复

1 引言

水土保持作为生态环境保护核心议题, 重点是采用植被重建的方式增强土壤抗侵蚀力, 作为连接植被及土壤的纽带, 不只是承担水分养分吸收的器官, 更是增强土壤抗侵蚀能力及改良结构的核心支撑。本文依托国内外研究的实际进展, 从根系固土基础机理、相关影响因素及应用策略三方面进行分析, 目的是为各个区域的水土保持工程提供可实施的理论支撑。

【作者简介】张宝军(1972-), 男, 中国内蒙古阿拉善人, 本科, 从事森林资源保护研究。

2 植物根系固土的基础机理

2.1 物理力学固土机制

2.1.1 根系网络的机械锚定效应

根系借助主根、侧根和须根构建起立体网络状结构, 楔入土壤孔隙造成机械的阻力, 直径处于 1-5mm 的细根(吸收根), 数量占根系总量 60%-80%, 其密集地分布构建出“土壤-根系复合体”, 极大增强土壤抗剪切的实际强度。

2.1.2 根系生长的土壤改良作用

根系生长进程里的机械压力可让土壤颗粒重新排列起来, 减少大孔隙的占比, 引起微团聚体含量的增加, 多年生植物根系随季节交替而生长与死亡, 会于土壤里留下生物通道, 在雨季期间, 这些通道可推动水分快速下渗, 减少地表

径流造成的冲刷。

2.1.3 枯落物分解的辅助固土效应

根系凋落物分解得来的有机胶体,可凭借吸附作用强化土壤颗粒间的粘结力,当分解时释放的多糖类物质(如葡萄糖醛酸)能把土壤颗粒胶结成稳定团聚体,带动水稳性团聚体含量升高,减弱土壤侵蚀方面的敏感性^[1]。

2.2 生物化学固土机制

2.2.1 根系分泌物的胶结作用

根系每年都往土壤里分泌了有机物质,涉及多糖、氨基酸及各类有机酸,多糖类物质能充当天然的聚合粘结剂,把土壤颗粒粘结成直径在1-5mm的团聚体,实现土壤团聚体稳定性的提高,如柠檬酸、苹果酸的有机酸借助螯合作用溶解土壤中的钙、铁离子,带动矿物颗粒达成胶结及团聚。

2.2.2 根际微生物的协同效应

根系凭借分泌碳源,让根际微生物(细菌、真菌、放线菌)聚集起来,塑造密度为 10^8 - 10^9 CFU/g的微生物群落,这些微生物借由代谢活动产出胞外多糖,进一步加大土壤颗粒的黏合强度,与此同时对有机物质分解释放养分,促成土壤团粒结构的构建与留存。

2.2.3 根系-土壤的化学交互作用

豆科植物根系跟根瘤菌共生发育成的根瘤,可凭借氮素输入改良土壤的理化性质,提高土壤中有机质含量及持水本领,诸如桦树、桤木的非豆科植物,经根系分泌麦根酸等铁载体活化土壤内的磷、铁等元素,从侧面推动土壤结构的改进。

2.3 群落生态固土机制

2.3.1 垂直根系结构的互补效应

深根性植物(像杨树、松树这类)与浅根性草本(像禾本科、豆科这类)搭配造就的复合群落,可在各异土层搭建起立体固土网络,深根借助“锚定效应”稳固深层土壤,凭借“加筋效应”,浅根强化了表土稳定性,二者协同可增强土壤抵抗侵蚀的能力^[2]。

2.3.2 物种间的功能协同作用

在豆科植物跟禾本科植物混播之际,豆科凭借固氮作用推动禾本科根系生长,豆科可借助禾本科的须根系统得到机械支撑,造就“资源互补与结构协同”的固土范式。

2.3.3 植被演替的固土强化效应

从草本历经灌木到乔木的演替过程之际,根系生物量连同土壤有机质含量稳步上扬,引发土壤抗剪强度上升,类似针阔混交林的顶级群落根系系统,可使土层抗侵蚀能力达到裸地5-8倍之多。

3 根系固土能力的影响因素

3.1 植物自身特性

3.1.1 根系形态结构参数

细根中直径0.2-1mm根系的占比越高,土壤加筋效果愈显突出,其比表面积(20 - $50\text{m}^2/\text{g}$)可供给更多黏结的点位,根系侧根跟主根的夹角(30° - 60°)越小,根系网络所遇的机械阻抗变高,抗剪切能力获得10%-15%的增长,就根

系生物量分配而言,多年生植物把30%-50%生物量给到根系,其固土效果显著强过一年生植物。

3.1.2 生理生态特性

诸如杨树、刺槐的速生植物,根系年生长量可达1-2米每年,可迅速搭建起稳固的固土网络,能应对水土流失的紧急治理情形,寿命不足1年的短命细根周转可源源不断地提供有机物质,拉动土壤团聚体的更新节奏,长命粗根(寿命>5年)主要起到机械方面的支撑作用。

3.2 土壤环境条件

3.2.1 土壤物理性质

在砂质土壤环境下,根系的加筋效应尤为显著,抗剪强度增加30%-40%,而在黏质土壤中,根系分泌物所起的胶结作用更为突出,使团聚体稳定性上升20%-30%,若土壤含水率处在田间持水量的60%-80%范围,根系与土壤呈现出最强的黏结力,一旦超出这一范围(>90%或<30%),固土效果就会变差。

3.2.2 土壤化学性质

中性至微酸性(pH6.0-7.5)的土壤对根系分泌物的胶结作用最为有利,若土壤过酸(pH<5.0)或过碱(pH>8.5),固土能力将降低15%-25%,若土壤的氮(>1.0g/kg)、磷(>0.5g/kg)含量充足,根系生物量呈现增长,固土功效随之上扬。

3.3 外部环境因素

若暴雨频次(>50mm/h)增加,地表径流冲刷会加剧,减弱根系对土壤的稳固效果,但年降水量在400-800mm的长期适度降水,可促进根系的生长与分泌物的分泌,温带区域里,植物根系固土作用的季节性差异明显,于夏季(温度20-25℃)阶段,根系活性最强,固土能力比冬季(<5℃)时高出1.5-2.0倍。

4 基于根系固土机理的水土保持应用策略

4.1 适地适树的物种配置原则

4.1.1 干旱半干旱区域的物种选择逻辑

在降水匮乏、蒸发旺盛的干旱及半干旱区域,物种配置需把“耐旱抗逆、深根固土”当作核心内容,优先抉择具有肉质根系与深根系统的植物,该类植物的根系可扎进地下土层,基于机械锚定作用让沙质土壤紧实,如沙生灌木根系能穿透那干硬的土层去汲取水分,其水平根延展范围可达到植株冠幅的数倍数值,在地表铺就根系网络,高效抑制风沙的漂移。物种的配置应依照“乔灌草结合”的层级准则,上层采用耐旱乔木,依靠其深根体系对深层土壤加以固定;中层采用配置灌木之法,借助其多分支根系构成的网络增强中层土壤稳定性;于下层引入草本植物种植,依靠须根系统增强表土的固持能力,该种立体排布可在不同土层形成固土的防护屏障,迎合干旱区降水有限、蒸发迅猛的气候特质,同时降低植物之间的水分争夺^[3]。

4.1.2 湿润山地丘陵区的物种组合策略

湿润地区呈现出优越水热条件,物种搭配应留意“深

根与浅根相补、常绿同落叶结合”，深根性乔木里的栎类、松类，其主根能钻进岩缝或更深的土层里面，起到“锚杆”般的功效，维持坡体土壤的稳固；类似杜鹃、蔷薇的浅根性灌木，侧根发达且分布弥漫，可切实固持表层泥土，减少坡面径流造成的冲刷。草本植物则挑选耐阴湿的类别，其须根系可对土壤孔隙进行填充，增强土壤团粒结构紧实度，在物种功能搭配事宜上，根系的生态化学作用需纳入考量，若豆科植物与非豆科植物实施混植，豆科植物凭借根瘤固氮改善了土壤养分状况，促进其他植物根系茁壮成长；非豆科植物根系的分泌物可实现土壤矿物质的活化，二者造就了功能互补的稳固土壤机制。

4.1.3 陡坡与侵蚀沟道的快速固土物种选择

针对像陡坡、侵蚀沟道那样水土流失严重区域，物种配置应突出呈现“速生性、强繁殖力”特质，筛选根系萌蘖能力突出、生长迅速的植物，像刺槐、紫穗槐这类，其根系在短时间里可形成密实网络，迅速稳固坡面，草本植物优先把匍匐生长或丛生型种类选上，就像高羊茅、结缕草之类别，其根系能迅速地把地表给覆盖了，减轻水土流失现象。就物种配置的模式而言，可采用以“先锋物种+目标物种”的渐进策略，初期栽植速生草本及灌木，迅速控制住水土流失；若土壤条件实现改善后，循序渐进地引入乔木等目标物种，造就稳定的土壤固持群落。

4.2 群落结构优化的技术路径

4.2.1 垂直分层的立体配置模式

构建“乔木层-灌木层-草本层”三级垂直结构是优化群落固土功能的核心要点，乔木层成为顶层的阻隔屏障，其发达的深根系统能稳固深层土壤，其高大冠幅可让降雨动能得以削弱，缓解坡面的冲刷现象；灌木层居于中间区间，其多分支根系网络可实现对中层土壤的固持，同时阻断坡面径流的流动，减缓水流的流速；地表为草本层所遮盖，须在耕作层呈密集分布状，能切实减少雨滴溅蚀及表土的流失量，配置各层植物需把根系分布的空间互补性纳入考虑，乔木主根径直扎进深层土壤，灌木侧根不断扩展，草本须根密密麻麻地布满表层，造就立体式的固土网络，防止根系于同一土层抢夺资源^[4]。

4.2.2 水平镶嵌的景观格局设计

凭借地形地貌特征开展植物群落水平镶嵌的配置工作，可增强整体上的固土效应，在山顶地段留存或复现原生草甸，以草本植物须根系统拦截坡面涌来的水；于山坡地段栽植乔木林，借深根之力固持坡体土壤；沟谷之处配置灌木群落，借其丛生根系拦截泥沙。此“山顶截断水流-山坡固定土壤-沟谷阻拦泥沙”的水平镶嵌模式，可构建起一套完备的水土保持系统，在农田四周或道路两旁，可构建成带状的防护树林带，要根据风速、地形等因素来明确防护林带的宽度及植物组成，大多由2至3行乔木联合组成，搭建起防风固土的防护屏障，林带配置应顾及与周边自然植被的衔接，

杜绝出现生态隔绝区域，增大整体景观的固土功效。

4.2.3 时间序列的动态群落构建

演替进程推动下，植物群落固土功能变动，群落构建需按照植被演替规律开展时间序列的安排，初期（1-3年），要选择速生的草本及灌木种类，诸如紫花苜蓿、沙柳之属，这些植物根系生长速度迅猛，可在短期内实现地表覆盖，杜绝水土流失恶化；当处于中期（3-10年）时引入先锋乔木，诸如杨树、刺槐之类，塑造灌木-乔木过渡型群落，逐步提升固土的综合能力；超过10年的长期里，通过自然演替形成稳定顶级群落，好比针阔相互混交的林分，此时根系生物量以及土壤有机质含量达较高的水准，固土作用渐入稳定阶段，处于群落演替开展阶段时，要定期调整群落的物种组成，剔除衰退中的先锋物种，助力目标物种实现生长。

4.3 长效管理维护机制

4.3.1 根系健康监测体系的构建

构建科学的根系健康监测体系是保障群落固土功能的根基，监测内容有根系生物量、分布的密度、根系活力这类指标，可采用土钻法依一定周期采集根系样本，分析各土层根系的分布情形；凭借 TTC 染色法测定根系的活力值，测定根系的生理状态水平；利用诸如地下根系扫描仪的技术，采用无损手段监测根系生长动态^[5]。

4.3.2 适应性干预措施的实施

针对各类环境胁迫因子，规划适应性的干预行动，干旱年份可借助穴灌结合保水剂的途径，在植物根系周边挖掘洞穴，施入保水剂接着实施灌水，提高根系对水分的吸收力；暴雨过后赶快清理坡面的各类杂物，于冲刷严重的地段覆盖秸秆以及地膜，守护根系不遭破坏，然后补种速生草本植株，快速促成地表覆盖的恢复。

5 结论

植物根系依靠物理力学效应、生物化学作用及群落生态协同，强化了土壤抗侵蚀能力，为水土保持的核心生物途径。后续研究需进一步把遥感监测、大数据分析等技术结合起来，增强根系固土评估的精准水平，同时进一步开展气候变化背景下根系适应性的研究，为全球范围内的水土保持给出更科学的理论支撑。

参考文献

- [1] 伊廷欣,黄韬,陈先明,等.藤本植物在生产建设项目边坡防护中的应用前景分析[J].江西水利科技,2024,50(06):453-457.
- [2] 路娟娟,柴路艳,李晓芬.生态修复技术在水土保持工程中的应用探究[J].黑龙江环境通报,2024,37(10):154-156.
- [3] 温希望,宋艳曦,蔡崇法,等.植物生物力学特性在水土保持领域的研究进展与热点[J].水土保持通报,2023,43(04):338-346+355.
- [4] 梅红,马柯,刘瑾,等.生态型稳定剂协同植物根系固土特性及机理研究[J].水利水电科技进展,2023,43(04):52-58.
- [5] 曾红艳,吴美苏,周成,等.根系与植筋带固土护坡的力学机理试验研究[J].岩土工程学报,2020,42(S2):151-156.