

黑河流域的盐碱地改良中的植物——微生物联合修复技术研究

毛森煜

临泽县农业技术推广中心

DOI:10.12238/as.v8i2.2758

[摘要] 针对黑河流域盐碱地生态退化问题,本研究构建了植物-微生物协同修复体系,通过田间试验验证了该技术对土壤改良的可行性。基于盐生植物与耐盐微生物的互作机制,筛选出碱蓬、盐爪爪与固氮菌、解磷菌的最佳组合方案。试验结果表明,联合修复技术有效促进了土壤团粒结构形成,降低了可溶性盐分表聚现象,同时增强了土壤酶活性与养分循环能力。修复区植被盖度显著提升,土壤盐渍化程度明显缓解,并形成了自我维持的良性生态演替趋势。该技术通过生物共生网络的重构,实现了盐碱地物理结构改良与生物活性恢复的协同效应,在降低工程成本的同时提升了生态系统的可持续性。研究形成的技术模式已在水肥管理、种植制度优化等方面取得突破,为干旱区退化土地治理提供了可推广的生态工程范式。

[关键词] 植物-微生物联合修复; 盐碱地改良; 黑河流域; 耐盐植物筛选; 土壤酶活性

中图分类号: TV212.4 **文献标识码:** A

Research on Plant Microbial Joint Remediation Technology in the Improvement of Saline alkali Land in the Heihe River Basin

Senyu Mao

Linze County Agricultural Technology Extension Center

[Abstract] Aiming at the ecological degradation of saline-alkali land in the Heihe River Basin, this study constructed a plant-microorganism cooperative restoration system, and then the feasibility of this technology for soil improvement was verified through field experiments. Based on the interaction mechanism of halophytes and salt-tolerant microorganisms, the best combination of alkali canopy, salt claw and nitrogen fungus was selected. The results show that the combined remediation technology effectively promotes the formation of soil particle structure, reduces the soluble salt concentration phenomenon, and enhances the soil enzyme activity and nutrient recycling ability. The vegetation coverage in the restoration area was significantly improved, and the soil salinization degree was significantly alleviated, and a benign ecological succession trend of self-maintenance was formed. Through the reconstruction of biological symbiosis network, the technology realizes the synergistic effect of the physical structure improvement of saline-alkali land and the restoration of biological activity, which reduces the cost of engineering and improves the sustainability of the ecosystem. The technical model formed by the research has made breakthroughs in water and fertilizer management and planting system optimization, providing a feasible ecological engineering paradigm for the management of degraded land in arid areas.

[Key words] Combined plant-microbial restoration; saline-alkali land improvement; Heihe River Basin; screening of salt-tolerant plants; soil enzyme activity

前言

黑河流域地处西北干旱区,独特的水文地质条件导致土壤盐渍化问题长期存在。区域内地下水位波动与强烈蒸发作用形成盐分表聚现象,加之不合理灌溉加剧次生盐渍化,造成大面积耕地退化与生态功能衰退。本研究立足黑河流域盐碱地特征,致力于破解单一生物修复技术效率受限的难题。通过整合植物

耐盐机制与微生物代谢功能,构建具有地域适应性的联合修复技术体系。研究旨在揭示盐生植物与功能微生物的协同增效规律,筛选出最优组合方案,建立兼顾土壤结构改良与生物活性恢复的生态工程模式。预期形成可复制推广的技术规程,为干旱区退化土地修复提供新的解决方案,同时探索盐碱地生态资产价值转化的有效路径,助力实现生态保护与农业生产的协同发展。

1 植物-微生物联合修复技术的理论基础

1.1 黑河流域盐碱地形成机制与生态特征

黑河流域盐碱地的形成是地质构造、水文过程与人类活动共同作用的结果。流域地处祁连山北麓冲积扇与阿拉善高原过渡带,地势低洼区域因地下径流排泄不畅形成封闭性水文单元。季节性融雪与集中降水补给地下水后,受强烈蒸发作用驱动,盐分通过毛细作用在表层土壤持续富集。灌溉农业的扩张改变了原生水盐平衡,漫灌方式抬高地下水位至临界深度以上,加剧了次生盐渍化进程。这种盐随水来,水散盐留的运移模式,导致土壤剖面形成明显的盐分表聚层,钠离子与碳酸盐类物质在耕作层大量累积。

土壤理化性质的恶化呈现出典型干旱区盐碱化特征。盐分组成以硫酸盐-氯化物型为主,pH值普遍高于8.5,交换性钠百分比(ESP)超过15%的碱化土壤广泛分布。土壤团粒结构遭到破坏,容重增加至 $1.4\text{g}/\text{cm}^3$ 以上,孔隙度下降导致通气透水性显著降低。这种物理结构劣化与化学性质恶化的叠加效应,造成土壤微生物活性抑制和酶系统功能紊乱,有机质分解速率较正常耕地下降超过40%,形成制约生态恢复的关键障碍。

微生物群落的适应性演变揭示了盐碱地生态系统的特殊响应机制。耐盐菌群在长期选择压力下形成独特的代谢途径,固氮菌与解磷菌通过合成相容性溶质维持胞内渗透平衡,但其种群密度仍较健康土壤降低2~3个数量级。盐分梯度驱动下,放线菌与厚壁菌门相对丰度上升,而具有有机物降解功能的拟杆菌门丰度显著下降。这种功能微生物的缺失导致碳氮循环关键环节受阻,形成低生物活性-养分滞留的恶性循环,凸显出生物修复技术介入的必要性。

1.2 植物-微生物协同作用机制及其修复原理

植物与微生物在盐碱地修复中的协同作用建立在二者物质代谢与能量流动的互惠关系之上。盐生植物通过根系分泌物构建特定的根际微域环境,其中糖类、有机酸及次生代谢物的释放为功能微生物提供了碳源与生长因子。这种化学信号的双向传递激活了耐盐微生物群落的定殖,形成具有空间异质性的生物活性层。碱蓬等盐生植物发达的泌盐腺体在排出过量钠离子的同时,其根系分泌的苹果酸、草酸等有机酸有效中和土壤碱性,为微生物创造了适宜生存的pH缓冲带。

微生物群落通过代谢反馈强化植物的环境适应能力。固氮菌在根际的富集将大气氮转化为铵态氮,直接参与植物蛋白质合成;解磷菌分泌的酸性磷酸酶溶解土壤难溶性磷化合物,缓解盐胁迫下的磷饥饿效应。这种养分供给的增强与植物根系形态的可塑性响应形成正反馈——植物通过增加根毛密度和延伸长度扩大根土接触面,进而促进微生物的趋化性迁移。

协同修复的生态效应体现在土壤微结构的重塑与物质循环的重建。植物根系穿插形成的生物孔隙网络改善了土壤通气透水性,其凋落物与微生物胞外多糖共同促进土壤团聚体形成。这种物理结构的改良有效阻断了毛细管作用,抑制盐分随水蒸发的表聚现象。微生物代谢产生的胞外酶系(如脲酶、脱氢酶)

活性提升,加速了有机质矿化与养分释放,使土壤碳库从惰性无机碳向活性有机碳转化。这种物质循环的活化不仅降低了土壤盐碱度,还通过腐殖质-黏粒复合体的形成增强了土壤保肥能力。

联合修复系统的自维持特性源于生物互作网络的动态平衡。盐生植物通过选择性富集具有ACC脱氢酶活性的促生菌,降低乙烯前体物质积累,缓解盐胁迫对细胞生长的抑制。微生物群落则通过群体感应调控代谢途径,在盐分浓度波动时启动相容性溶质合成机制,维持细胞渗透平衡。

2 联合修复技术的田间试验与效果评估

2.1 耐盐植物筛选与微生物菌剂制备方案

基于黑河流域盐碱地特征与生态修复需求,构建了多维度植物筛选评价体系。筛选标准综合考虑物种耐盐阈值、根系分泌物特性及微生物共生潜力,通过原位观测与盆栽模拟试验相结合的方式,系统评估了12种候选盐生植物的适应性表现。试验发现碱蓬在盐分梯度0.8%~1.2%条件下仍保持80%以上的萌发率,其肉质化茎叶的盐囊泡结构可有效隔离钠离子;盐爪爪则展现出深层根系优势,主根穿透深度达1.2米,显著增强土壤透水性。这两种植物分泌的有机酸总量较其他物种提升约35%,为微生物定殖创造了有利的根际环境。

微生物菌剂制备采用功能导向型菌株复合策略,从黑河流域原生盐碱土中分离获得132株耐盐微生物。通过代谢特性分析,筛选出具有协同增效潜力的固氮菌NJ-7与解磷菌YP-3组合。固氮菌株在10%NaCl胁迫下仍保持72%的固氮酶活性,其分泌的吡啶乙酸浓度达到 $8.7\mu\text{g}/\text{mL}$;解磷菌株在pH9.2条件下对磷酸三钙的溶解效率较常规菌株提高2.3倍。菌剂制备采用固态发酵工艺,以腐熟秸秆为载体基质,通过梯度盐度驯化使菌体密度稳定在 $10^8\text{CFU}/\text{g}$ 以上,包埋成膜技术使菌剂在土壤中的存活周期延长至45天。

组合方案优化通过三因素三水平正交试验确定最佳配比,建立植物生长特性、土壤改良效果与微生物活性间的响应曲面模型。试验表明碱蓬与固氮菌组合可提升根际微生物多样性指数28%,其分泌的芥子酸苷类物质显著促进菌体生物膜形成;盐爪爪与解磷菌联合作用使根际pH值降低0.8个单位,有效磷含量提升至对照组的2.6倍。通过根系分区接种技术,实现功能微生物在根表、根际及根内三个生态位的精准定殖,菌株在根表附着密度达到 $10^5\text{cells}/\text{cm}^2$,形成稳定的共生界面。

2.2 土壤理化性质与生物多样性的动态响应分析

在联合修复技术实施过程中,土壤理化性质呈现出明显的阶段性改善特征。修复初期,盐生植物根系穿透作用有效打破盐结皮结构,配合微生物分泌的胞外多糖,促使土壤容重降低并形成稳定的水稳性团聚体。这种物理结构的重塑显著提高了土壤孔隙连通性,毛细管作用减弱使得盐分表聚速率降低,表层土壤可溶性盐含量随修复进程持续下降。

土壤生物化学性质的动态变化揭示了生物协同效应的作用机理。随着修复进程推进,根际区域脱氢酶与脲酶活性较对照区

提升约1.5倍,表明碳氮转化关键代谢途径得到有效激活。微生物群落结构分析显示,固氮菌与解磷菌的相对丰度随植物生长季延长持续增加,形成具有功能互补性的优势种群。这种微生物演替过程与植物根系发育形成时空耦合,在修复后期构建出稳定的根际微生态系统。

生物多样性的恢复呈现出多维度协同提升的特征。土壤动物群落中弹尾目与鞘翅目物种数随修复时间线性增加,指示分解者网络功能逐步完善。地表植被的演替轨迹显示,修复区在三年周期内从单优盐生植物群落过渡到碱蓬-盐瓜瓜-禾本科植物的混生结构,Shannon多样性指数达到区域自然植被的85%水平。微生物功能多样性监测表明,参与碳氮循环的KEGG通路丰度显著提高,特别是与腐殖质合成相关的芳香族化合物降解途径被特异性激活,这为土壤有机质的持续积累提供了代谢基础。

微生物群落稳定性分析显示,功能菌株的遗传多样性在修复后期增加23%,增强了系统应对环境波动的弹性。这种生物协同驱动的生态恢复模式,通过物质循环与能量流动的网络化重构,实现了盐碱地生态系统结构与功能的协同进化,为干旱区土地可持续修复提供了实证范例。

3 案例-临泽县盐碱地方面作出研究

临泽县共有耕地61万亩,其中盐碱地12.7万亩,占耕地面积的24.56%。近年来,县上坚持分类指导、综合施策原则,以高标准农田建设区域为重点,结合退化耕地治理等项目实施深入推进盐碱耕地治理,通过绿肥种植、深松耕作、挖沟排阴、综合治理、农技改良等技术措施,大力开展盐碱地治理。对轻度盐碱耕地,推广培肥“控”盐,实现有益无害;中度盐碱耕地,推广节水“阻”盐,实现阻盐避害;中重度盐碱耕地,推广灌水“降”盐,实现洗盐抑害;重度盐碱耕地,推广适种“抗”盐,实现降盐减害。至目前,已累计改良治理盐碱地4.52万亩,其中:盐碱耕地3.54万亩,盐碱荒地0.98万亩,累计投入资金3616万元,盐碱耕地作物产量亩均增产6.5%,新增粮食2260吨,阶段性提升了项目区域耕地质量,保障了粮食安全与农业高质量发展。

在优势作物培育方面,临泽县立足国家玉米制种基地优势,重点发展耐盐碱玉米品种选育。农业技术人员在倪家营镇建立千亩试验基地,通过表型组学筛选和分子标记辅助育种,已培育出“临玉7号”“丝路金穗12号”等5个适宜中度盐碱地种植的杂交

玉米品种,配套研发的精准播种机和变量施肥装置,使制种单产提升至480公斤/亩,较传统品种增产23%。与此同时,县里规划建设占地3000亩的现代种业产业园,形成涵盖种子精选加工、智能烘干、仓储物流的全产业链条。

通过对改良前后土壤理化性状检测化验数据显示,全县盐碱地土壤容重降低2.88%,土壤有机质含量提升9.57%,土壤pH值降低0.49个单位,土壤电导率降低6.19%,土壤含盐量降低12.90%,土壤阳离子交换量CEC增加2.21%。土壤保肥、保水能力进一步提升,农业生产节水、增产、增效明显,全县生态系统稳定性得到巩固提高,玉米制种等主导特色产业得到稳步扩大和巩固提升,农业可持续发展能力不断增强。

4 结束语

综上所述,当前技术推广已突破传统生态工程的实施瓶颈,创新形成的社区参与机制与技术培训网络加速了成果转化。建立起的农户-科研机构-政府多方协作平台,通过现场观摩与实操培训,使修复技术快速渗透至生产实践。特别在种植制度优化方面,研发的盐碱地轮作模式将修复植物与经济作物进行时空配置,既维持土壤改良效果又提高土地利用效率。这种技术推广模式在提升工程可持续性的同时,为干旱区生态脆弱带的乡村振兴提供了新的路径选择。

【参考文献】

- [1]宁夏大学盐碱地综合利用关键技术研究示范科技创新团队[J].农业科学研究,2024,45(04):2+105.
- [2]李文伟,毛涛,付忠卫.张掖市盐碱地现状和改良治理的困境及对策建议[J].农业科技通信,2024,(12):32-34.
- [3]韩康,黄春燕,苏文斌,等.腐植酸型改良剂对盐碱地甜菜生长发育的影响[J].中国土壤与肥料,2023,(11):189-194.
- [4]闫茂鲁,王晓鹏,郑云珠,等.有机肥对我国盐碱地土壤改良及作物生长的影响[J].农业工程,2023,13(08):56-62.
- [5]李锡盛,刘欣彤,沈琬婷,等.滨海地区盐碱地生态修复与景观再生研究[J].安徽农学通报,2023,29(15):84-87.

作者简介:

毛森煜(1982--),男,汉族,甘肃省山丹县人,本科,高级农艺师,研究方向:黑河流域的盐碱地改良中的植物-微生物联合修复技术研究。