

功能微生物菌剂对设施菜地土壤次生盐渍化的改良效果及环境效应

马艳娟

徐州生物工程职业技术学院, 江苏 徐州 221006

DOI:10.61369/EAE.2026030012

摘 要 : 设施菜地土壤次生盐渍化是制约设施农业可持续发展的突出障碍因子, 而功能微生物菌剂作为环境友好型生物修复手段在盐渍化土壤改良中已有极好的应用前景。文章系统回顾了设施菜地土壤次生盐渍化的成因、危害及现状, 继而分析了功能微生物菌剂(以植物根际促生细菌 PGPR 及芽孢杆菌属菌株为重点)改良盐渍化土壤的三大明确机制: 盐基阳离子络合固定、细胞外聚合物促团聚体形成及根际微生物群落调控。在此基础上, 从土壤理化性质改善、微生物群落重构、作物产量品质提升三个方面对改良效果做了严谨的定量分析, 还对功能微生物菌剂施用的环境效应作了科学评价。已有数据表明, 所选功能微生物菌剂能显著降低土壤电导率(降幅 14%–53%), 增加土壤大团聚体比例 65% 以上, 作物产量提高 15%–17%, 同时提高有机质含量、优化微生物群落结构, 带来直接而明确的正向环境效应, 对功能微生物菌剂在设施农业中的应用有极好的指导意义。

关 键 词 : 功能微生物菌剂; 设施菜地; 次生盐渍化; 土壤改良; 微生物群落; 环境效应

The Improving Effect and Environmental Impact of Functional Microbial Agents on Secondary Salinization of Greenhouse Vegetable Soil

Ma Yanjuan

Xuzhou Vocational College of Bioengineering, Xuzhou, Jiangsu 221006

Abstract : Secondary salinization of greenhouse vegetable soils is a prominent obstacle to the sustainable development of greenhouse agriculture. Functional microbial agents, as an environmentally friendly bioremediation method, have shown great promise in the improvement of saline-alkali soils. This article systematically reviews the causes, hazards, and current status of secondary salinization in greenhouse vegetable soils. It then analyzes three clear mechanisms by which functional microbial agents (focusing on plant rhizosphere growth-promoting bacteria PGPR and *Bacillus* strains) improve saline-alkali soils: basic cation complexation and fixation, promotion of aggregate formation by extracellular polymeric substance, and rhizosphere microbial community regulation. Based on this, a rigorous quantitative analysis of the improvement effect is conducted from three aspects: improvement of soil physicochemical properties, reconstruction of microbial communities, and enhancement of crop yield and quality. The environmental impact of functional microbial agent application is also scientifically evaluated. Existing data show that the selected functional microbial agents can significantly reduce soil electrical conductivity (by 14%–53%), increase the proportion of large soil aggregates by over 65%, and improve crop yield by 15%–17%. Simultaneously, they increase organic matter content and optimize microbial community structure, resulting in direct and clear positive environmental effects. This provides excellent guidance for the application of functional microbial agents in facility agriculture.

Keywords : functional microbial agents; greenhouse vegetable field; secondary salinization; soil improvement; microbial community; environmental effects

引言

设施农业对保障蔬菜供应、增加农民收入都有极其重要的作用, 但环境封闭、连作以及不合理水肥管理都导致土壤次生盐渍化问题日趋严重, 成为制约设施农业可持续发展的根本障碍。我国设施蔬菜面积已达 400 多万公顷, 相当大的比例的土壤已发生次生盐渍化,

当含盐量超过1 g/kg时即可明确判断,严重时可见“绿苔”“白霜”“红膜”诸种典型症状^[1]。该问题直接抑制根系吸水,破坏养分平衡,又降低作物抗病能力,因此必然影响产量及品质。

目前治理盐渍化土壤的主要措施是水洗盐、深耕改土、轮作倒茬及施用调理剂,但诸种方法都存在耗水大、成本高、效果不持久等明显缺陷^[2]。与此形成极好补充的是功能微生物菌剂,其作为环境友好型生物修复技术^[3],不仅能直接降盐,还可改善土壤结构、提高肥力,已有实验结果表明菌剂处理可使有机质提高18.7%,电导率降低32.5%。不过,不同菌株组合效果差异很大,其不同盐渍化程度土壤中的适应性尚未厘清,长期环境效应尚待系统评价。

一、材料与方法

(一) 功能微生物菌剂概况

本综述所述的功能微生物菌剂主要涵盖以下几类:(1)植物根际促生细菌,包括耐盐芽孢杆菌属菌株如解淀粉芽孢杆菌、地衣芽孢杆菌和枯草芽孢杆菌等;(2)特定功能真菌菌株,如哈茨木霉;(3)复合微生物菌剂产品,如NCT-2菌剂等;(4)微生物与有机物料联合施用的生物有机类复合调理剂。这些菌株通常具有耐盐、解磷、固氮、产细胞外聚合物等一种或多种功能特性^[4]。

(二) 文献检索与分析策略

本研究采用了系统文献综述的方法,先明确检索设施菜地土壤次生盐渍化及功能微生物菌剂改良盐渍化土壤的国内外相关文献,优先选取2020—2026年发表的文献,且对中英文文献都予以检索。纳入标准十分清楚:研究对象为设施蔬菜土壤或盐碱土壤,所用改良措施为微生物菌剂或生物有机物料,所测指标必须包括土壤理化性质、微生物群落变化及作物产量品质等改良效应指标。更难得的是,分析方法将定性定量有机结合,对土壤电导率、硝酸盐含量、有机质含量、微生物多样性指数、作物产量诸指标做了严谨系统的比较。

(三) 评价指标体系

改良效果的评价指标主要包括:(1)土壤理化指标:电导率(EC)、pH值、硝酸盐含量、有机质含量、铵态氮、有效磷、速效钾、土壤容重等;(2)土壤生物学指标:微生物量碳、土壤酶活性(脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶等)、细菌和真菌群落多样性与丰度;(3)作物指标:产量、株高、茎粗、品质指标(维生素C含量、可溶性固形物等);(4)环境效应指标:硝酸盐淋失风险、土壤有机碳储量变化、微生物群落功能多样性等。

二、结果与讨论

(一) 设施菜地土壤次生盐渍化的成因与危害

1. 主要成因

设施大棚缺乏天然降雨的淋洗作用,未被作物吸收的肥料成分随水分蒸发不断向表土聚集,是次生盐渍化最根本的原因。具体成因可归纳为:第一,过量施肥与不合理配比,尤其氮肥过量导致硝酸盐大量积累,且含量随种植年限增加而持续上升。第二,封闭或半封闭环境阻隔自然降水,蒸发量大而淋溶量小,盐分在表土逐渐富集。第三,高复种指数与长期连作使土壤得不到休整,盐分无法自然消减。第四,不合理灌溉方式如大水漫灌,既浪费水资源又引发板结,加剧盐分表聚。此外,次生盐渍化常

伴随土壤酸化,二者相互作用恶化土壤环境。盐分离子主要包括 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 以及 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 。

2. 危害分析

次生盐渍化对设施蔬菜的危害具有诸多方面:第一,土壤溶液浓度大于细胞液浓度时即阻碍根系吸水,因而引起生理性干旱,严重时导致脱水死亡。第二,高盐环境抑制根系生长,打乱根系养分离子平衡,故易出现缺素症状。第三,盐渍化使作物抗病虫害的能力降低,因此更易遭受土传病害侵袭。第四,直接造成农产品品质劣化,表现为硝酸盐超标、维生素含量下降等具体问题。从土壤生态学的角度再做系统补充:盐渍化破坏微生物群落结构,降低其多样性及丰度,从而弱化养分循环功能及土壤自我修复能力,形成“盐分积累—微生物区系恶化—土壤功能退化”的恶性循环。

(二) 功能微生物菌剂的改良机制

功能微生物菌剂的改良机制是多层次、多途径的,可从化学、物理和生物学三个层面加以理解^[5]。

1. 盐基阳离子的络合固定

芽孢杆菌属菌株代谢产生的有机酸和多糖类产物,可通过络合作用固定盐基阳离子(如 Ca^{2+} 、 Na^+ 等),降低水溶性盐含量。施用含解淀粉芽孢杆菌、地衣芽孢杆菌和枯草芽孢杆菌的生物有机肥后,土壤总钙、交换性钙和水溶性盐含量显著降低,这是菌剂直接降盐的关键途径。

2. 细胞外聚合物促进土壤团聚体形成

微生物分泌的胞外聚合物(EPS),包括蛋白质、多糖和糖醛酸等,在颗粒间发挥“生物胶水”作用,显著促进大团聚体形成。中国农业科学院团队^[6]筛选8株芽孢杆菌和2株木霉菌株试验表明,解淀粉芽孢杆菌和哈茨木霉接种使大团聚体含量分别增加65.12%和71.93%,团聚体平均重量直径分别提高34.47%和43.68%。偏最小二乘路径模型揭示,EPS和微生物量碳是团聚化关键驱动因子,团聚性改善有利于盐分淋洗和排出。

3. 根际微生物群落的定向调控

菌剂引入后以“抑害促益”双重机制重塑了根际微生态^[7]:先让外源有益菌抑制尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum*)增殖,故其丰度降低了61.4%,又激活碳氮循环关键酶,使 β -葡萄糖苷酶、硝酸还原酶活性分别提高142%和87%。更难得的是,施用生物有机物料(秸秆+菌剂)直接驱动细菌群落向有利于养分转化的方向演变:中度盐渍化土壤中富集富营养型类群(β -Proteobacteria和Bacteroidetes),重度盐渍化土壤中寡营养类群(Acidobacteria和Chloroflexi)丰度增加,二者协同降低土壤硝酸盐含量,实质上降低了盐分。

（三）改良效果分析

1. 土壤理化性质的改善

菌剂对盐渍化土壤理化性质的改良已有扎实的科学证据支撑。就盐分指标而言,郭鹏飞等以西安日光温室芹菜为试验材料,系统地证明不同菌剂梯度处理使电导率降低14.08%–38.45%,硝酸盐明显降低,而联合施用耐盐 PGPR 与有机改良剂之后效果最优^[8],电导率降低了52.69%,有机质提高了54.37%。就养分指标而言,生物有机物料处理后有机质及铵态氮含量都显著提高,硝酸盐大幅度下降,由此得出结论:菌剂促进了硝酸盐向铵态氮的转化,有效磷、速效钾分别提高11.85%和39.57%。物理结构方面也明确说明了微生物活性及其代谢产物如何增加孔隙度,大团聚体含量增加因而通气透水性能大为改善。

2. 土壤微生物群落的响应

菌剂施用对微生物群落结构有极其深远的影响:细菌群落中 Actinobacteria 相对丰度增加了2.3倍, Bacillus 增加1.8倍,联合施用后 Actinobacteriota 和 Starmerella 都得到富集,细菌网络的复杂性及互连性都相应提高。更重要的是,生物有机物料处理虽然导致细菌多样性及丰度暂时降低,但是属于群落结构的优化而非退化,即向富营养型功能菌群转变,因此养分循环相关类群均被明显富集。真菌群落中 Shannon 指数下降15.2%,其根本原因就是致病真菌被有效抑制。酶活性方面,联合施用使蔗糖酶、脲酶和过氧化氢酶活性分别提高了147.69%、28.56%和30.26%,蛋白酶、碱性磷酸酶及多酚氧化酶也都显著增强,由此反映出养分转化效率的提高。

3. 作物产量与品质的提升

菌剂改良的根本目的是提高产量、保证品质。温室黄瓜接种后产量提高14.73%–17.43%,芹菜茎粗增加2.41%–8.11%^[9],维生素C最高提高63.80%,植株硝酸盐积累明显减少。番茄栽培中单果重提高10.58%,糖度提高25%,商品果率已达89.2%。所有增产提质现象均可归结于盐分降低、团聚体稳定、养分供给良好。

（四）环境效应评估

正向效应方面:菌剂降低土壤硝酸盐含量,同时中度、重度

盐渍化土壤中亚硝酸盐异化还原途径基因丰度分别增加了19.79%和56.84%,说明菌剂促进微生物转化而非淋溶损失,对地下水风险有明确抑制作用。菌剂提高了有机质含量,增强了土壤碳固存能力。更重要的是,微生物群落优化后生态系统稳定性及抗逆性都得到提高,有利于减少化肥农药投入,切实降低面源污染^[10]。此外,大团聚体数量增加有利于改善抗侵蚀能力,有利于水土保持。但也存在几项潜在风险:外源微生物引入可能对本底群落造成竞争排斥,其效应因盐渍化程度不同而异,菌株长期施用后是否发生功能退化或基因变异尚无系统评价,菌剂全生命周期的碳排放及能源消耗也宜被纳入完整环境评价之中。

三、结论与展望

功能微生物菌剂作为设施菜地土壤次生盐渍化的生物修复手段,在降盐、改土、优化微生物群落及增产提质方面效果显著,兼具正向环境效应。其机制主要包括盐基阳离子络合固定、EPS促团聚体形成及根际微生物群落调控,菌剂处理可使电导率降低14%–53%、大团聚体含量增加65%以上、作物产量提高15%–17%^[11]。

当前研究存在不足:目前各试验周期都太短,缺乏多年连续定位数据,因此菌株定殖能力及其长效性尚未弄清,不同盐渍化程度下的适应性差异尚无系统比较,其对土壤微生物群落长期演替的实际影响尚不明确,菌剂与有机物料、生物炭联合施用的协同效应及最优配比仍需田间验证,而环境风险评价体系尚不健全。

未来应着力于:开发以本地优势菌株为基础的高效复合菌剂,提高菌株的适应性及定殖力,再进行长期定位试验考察持续改良的效果及环境安全性,用宏基因组学、代谢组学等手段解析菌剂–土壤–作物系统中微生物功能的动态变化,构建联合施用的优化技术体系,形成针对不同盐渍化程度和作物的精准改良方案,建立菌剂施用的环境风险评价方法,保障生物修复的生态安全。

参考文献

- [1]孔凡忠.蔬菜大棚土壤盐渍化现状及改良措施[J].黑龙江粮食,2025(11).
- [2]宿福玥,张辰,熊子皓,等.设施栽培土壤盐渍化与酸化的成因及其防治措施研究进展[J].生态产业科学与磷氟工程,2025,40(5):106–112.
- [3]西安市农业技术推广中心.设施菜地土壤次生盐渍化防控技术指导意见[N].中国农村新闻网,2025–07–14.
- [4]陈朵朵,黄欣,张钰洁,等.生物有机物料添加对次生盐渍化土壤理化性质及细菌群落的影响[J].扬州大学学报(农业与生命科学版),2025,46(3):123–131.
- [5]He L, Li K, Wang N, et al. Effects of microbial inoculants on soil microbial communities and enhancement of tomato yield[J]. Journal of Microbiological Methods, 2025, 237: 107203.
- [6]Peng Y Y, Zhang H, Li G H, et al. Microbial inoculum improved soil aggregate formation and increased cucumber yield in a greenhouse under secondary salinization conditions[J]. Journal of Environmental Management, 2025, 376.
- [7]Yang Y M, Chen Y K, Gong X F, et al. Rhizosphere regulation by three Bacillus species and tomato productivity: A feasible approach for moderately saline-alkali soil remediation[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2026, 231: 111005.
- [8]He Y X, Ning Z F, Cui Y S, et al. Combination of functional complementary salt-tolerant PGPR and organic amendments modulates the soil micro-environment and promotes wheat growth[J]. Agriculture, 2025, 15(24): 2558.
- [9]章祖荣,章斯斯,徐蒋来.菌肥对设施芹菜产量及土壤细菌群落结构的影响[J].南方农业,2023,17(09):1–5+15.
- [10]Liang S, Wang S N, Zhou L L, et al. Combination of biochar and functional bacteria drives the ecological improvement of saline-alkali soil[J]. Plants, 2023, 12(2): 284.
- [11]Zhang Y, et al. Harnessing microbial resource *Rhodopseudomonas palustris* for saline-alkaline paddy soil amelioration: key role of extracellular polymeric substances[J]. Bioresource Technology, 2026.