

微生物-生物炭改良盐碱土互作机制研究进展

张少华¹, 赵欣鑫¹, 杨凯¹, 彭伟康¹,

杨超¹, 张雨欣¹, 赵佐平¹, 文广², 池泽涌³

(1. 陕西理工大学 化学与环境科学学院, 陕西 汉中 723001; 2. 陕西地矿汉中
检测有限公司, 陕西 汉中 723001; 3. 江西省科学院 资源与环境研究所, 江西 南昌 330096)

摘要: [目的] 系统梳理微生物与生物炭改良盐碱土的研究进展, 阐明协同作用机制, 识别潜在风险, 为技术系统化构建与风险管控提供理论依据。[方法] 基于文献计量方法, 系统综述微生物与生物炭协同改良盐碱土的研究进展与发展趋势, 重点解析其在物理结构构建、化学环境调节及生物功能强化等方面的协同机制, 并进一步探讨“材料-菌种-环境-管理”协同调控中可能存在的盐分输入与微生物竞争等潜在风险。[结果] 该联合策略通过生物炭提供物理庇护与电子传递通道、微生物介导盐分转化与代谢反馈, 协同提升土壤功能, 可显著降低盐碱土壤电导率, 提高作物产量, 并增强氮循环相关功能基因的丰度。[结论] 微生物-生物炭联合技术是一种绿色、可持续的盐碱地治理策略, 其协同机制涉及物理、化学与生物多维度作用, 在实验室与田间试验中均表现出良好的应用潜力。未来应围绕组合优化、机理深化、区域适配与技术融合等方向开展研究, 推动该技术的标准化与规模化应用。

关键词: 微生物; 生物炭; 互作机制; 协同改良; 盐碱地

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)02-0441-12

中图分类号: X53, S156.4⁺9

文献参数: 张少华, 赵欣鑫, 杨凯, 等. 微生物-生物炭改良盐碱土互作机制研究进展[J]. 水土保持通报, 2026, 46(2): 441-452. Zhang Shaohua, Zhao Xinxin, Yang Kai, et al. Research progress on microbial-biochar interaction mechanisms in saline-alkali soil improvement [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(2): 441-452.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.02.022

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.02.022

Research progress on microbial-biochar interaction mechanisms in saline-alkali soil improvement

Zhang Shaohua¹, Zhao Xinxin¹, Yang Kai¹, Peng Weikang¹,

Yang Chao¹, Zhang Yuxin¹, Zhao Zuoping¹, Wen Guang², Chi Zeyong³

(1. School of Chemical & Environmental Science, Shaanxi University of Technology,

Hanzhong, Shaanxi 723001, China; 2. Shaanxi Geological and Mineral Hanzhong Testing Co., Ltd., Hanzhong, Shaanxi 723001, China; 3. Institute of Resources and Environment, Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang, Jiangxi 330096, China)

Abstract: [Objective] The progress on microbial-biochar interaction mechanisms in saline-alkali soil improvement was systematically reviewed, in order to elucidate the mechanisms of synergistic effects, and identify potential risks, and provide a theoretical basis for the systematic development and risk management of this technology. [Methods] Using the bibliometric method, this study systematically reviews the research progress and development trends in the synergistic improvement of saline-alkali soil using microorganisms and biochar. It focuses on analyzing their synergistic mechanisms in physical structure construction, chemical environment regulation, and biological function enhancement. Furthermore, potential risks in the ‘material-strain-environment-

收稿日期: 2025-07-25

修回日期: 2025-10-29

采用日期: 2025-10-29

资助项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目“微生物矿化介导地下水铁锰砷自固定机理研究”(2024JC-YBQN-0255); 陕西省秦创原引高层次人才创新创业人才项目(QCYRCXM-2023-062); 陕西理工大学科学研究资助项目(SLGRCQD019); 陕西省科技创新团队项目(2025RS-CXTD-040)

第一作者: 张少华(2000—), 男(汉族), 陕西省宝鸡市人, 硕士研究生, 研究方向为环境功能材料研发。Email: zhangsh2919@163.com。

通信作者: 赵欣鑫(1992—), 男(汉族), 陕西省咸阳市人, 博士, 副教授, 主要从事土壤/水环境污染控制与修复研究。Email: zhaoxinxin@snut.edu.cn。

池泽涌(1995—), 男(汉族), 江西省赣州市人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤与地下水污染联合防治研究。Email: zeyongchi@163.com。

management' synergistic regulation, such as salt input and microbial competition, are discussed. [Results] This combined approach provides physical shelter and electron transfer channels through biochar, along with microbial-mediated salt transformation and metabolic feedback, thereby synergistically enhancing soil functions. It can significantly reduce the electrical conductivity of saline-alkali soil, increase crop yield, and enhance the abundance of functional genes associated with the nitrogen cycle. [Conclusion] The microbial-biochar combined technology is a green and sustainable strategy for saline-alkali land management. Its synergistic mechanisms involve multi-dimensional physical, chemical, and biological effects, demonstrating promising application potential in both laboratory and field experiments. Future efforts should continue to focus on combination optimization, mechanism elucidation, regional adaptation, and technology integration to promote the standardized and large-scale application of this technology.

Keywords: microorganisms; biochar; interaction mechanism; synergistic improvement; saline-alkali land

盐碱地是一类因土壤盐分过度富集而抑制植物正常生长的退化生态系统^[1],其形成过程受自然与人为因素共同驱动(图 1)^[2]。全球盐碱地面积约 $1.38 \times 10^9 \text{ hm}^2$,占陆地总面积 10% 以上,主要分布于澳大利亚、中亚等干旱地区。在中国,盐碱地主要分布在西北干旱区、松嫩平原和滨海地区,约占农田面积的 25%^[3]。研究表明,除蒸发强烈与排水不畅等传统因素外,干旱区地下水矿化度升高与毛管水上升速率加快,低渗透性土壤质地下盐分迁移行为的变化,农业中过量施用氮肥和钠盐对阳离子交换平衡的干扰,均成为加剧土壤盐碱化的关键机制^[4]。这些过程导致土壤团聚体结构破坏、有机质流失及氮、磷、钾等养分循环障碍,最终形成以高 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比,碱性增强和微生物群落结构退化为特征的退化系统^[5-6]。因此,改良盐碱土壤,不仅需降低表土盐分,更要修复结构,调控碳氮循环,重建功能微生物群落。

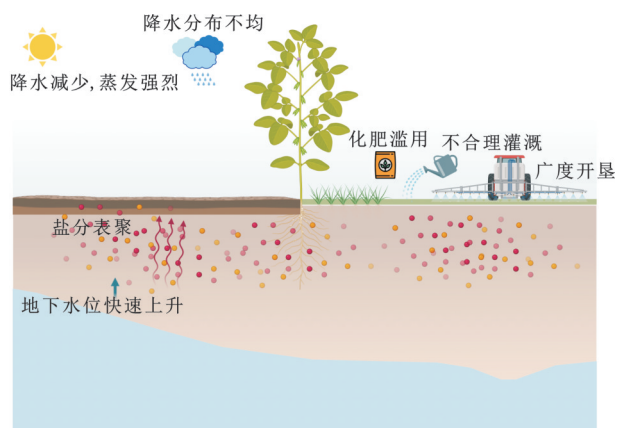


图 1 土壤盐碱化示意图

Fig.1 Schematic diagram of soil salinization

传统的物理与化学改良措施虽在短期内可缓解盐分胁迫,但普遍存在可持续性差和生态兼容性低的问题^[7]。深挖渗沟、客土回填等物理措施往往伴随有机质和矿物质流失且成本较高^[8-11];磷石膏等化学调理剂虽能中和土壤 pH 并促进盐分淋洗,却可能引

发二次盐渍化或破坏团聚结构^[12-14]。相比之下,生物改良方法依托功能微生物与植物根际互动,具有更好的系统性与环境友好性,但其应用仍面临菌剂存活率低、田间响应慢等问题^[15-17]。近年来,生物炭因其高比表面积、多孔结构及丰富官能团,被认为是一种同时具备物理改良和生态调控能力的理想材料^[18]。研究表明,经矿物掺杂或表面官能团改性的生物炭可显著提高土壤阳离子交换量,抑制 Na^+ 与 Cl^- 活性,并有效提升土壤持水能力与作物养分利用效率。对甘肃省白银市典型盐碱土的研究表明,施用 5% 稻壳生物炭,经过 180 d 培养即可使土壤电导率降低 14.2%,并将土壤阳离子交换量提高 83.3%^[19-20]。微生物-生物炭联合使用是一种新型土壤改良技术。生物炭为功能微生物(如固氮菌、解磷菌和植物根际促生菌等)提供良好的栖息地与代谢界面,而微生物通过分泌有机酸和胞外多糖增强生物炭对盐离子和养分的固持能力,共同促进土壤 pH 调节,有机质积累及团聚体形成^[21]。已有田间试验表明,施用矿物改性生物炭并接种促生微生物,可使盐碱地作物产量提高 50% 以上,同时显著提升硝化、固氮等功能基因丰度,优化氮素转化途径^[22-23]。然而,目前对不同菌株-生物炭组合的长期效应、微生物群落动态演变及碳-氮循环耦合机制缺乏系统与量化的研究,制约了该技术的大规模应用。

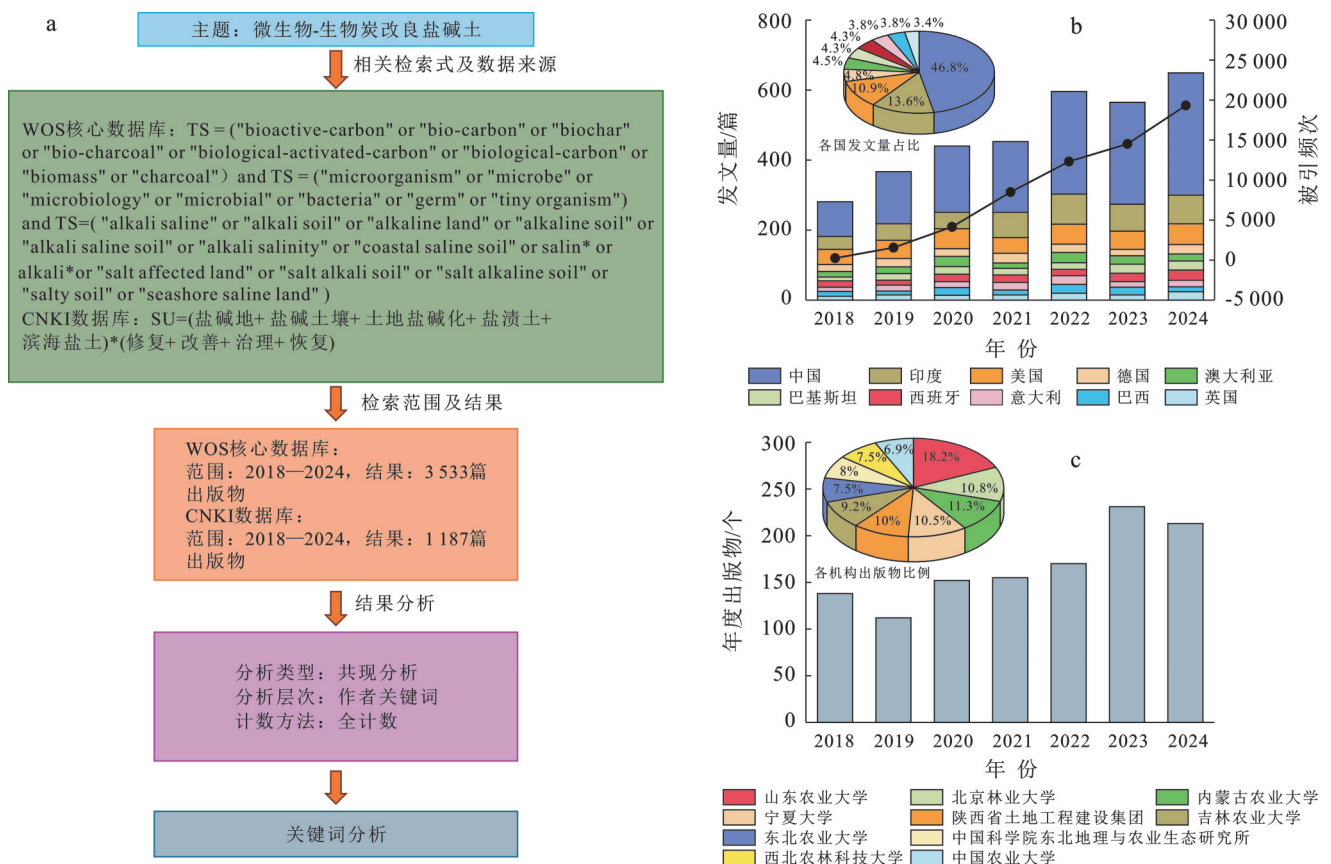
本研究基于 Web of Science 和中国知网数据库对 2018—2024 年文献进行系统检索与筛选,通过制定严格的去重与分级筛选标准,并辅以引用频次与期刊影响力等多维度评估,以核心文献集作为分析基础,揭示该领域全球研究格局与发展趋势。重点阐释微生物-生物炭在物理结构构建、化学环境调节与生物功能强化 3 个层面的协同效应,深入探讨孔隙定殖选择性与微生物间直接电子传递等微观机制,进而构建“材料-菌种-环境-管理”四维调控框架,系统评估盐分输入与微生物竞争等潜在风险并提出相

应对策。同时,融合文献计量与微观机制阐释,揭示跨尺度互作过程,提出四维调控策略,系统辨析生物炭类型与土壤质地的差异化响应机制,旨在为盐碱地绿色修复提供理论支撑与精准实践路径。

1 研究方法

本研究以“微生物协同生物炭改良盐碱地”为主题,基于 Web of Science 核心数据库 (WOS) 和 Chinese National Knowledge Infrastructure (CNKI) 数据库,结合可视化分析软件 VOSviewer,分析近年来国内外微生物协同生物炭改良盐碱地研究领域的现状、热点分布及发展趋势。WOS 核心数据库检索式设为 TS=(“bioactive carbon” or “bio carbon” or “biochar” or “bio charcoal” or “biological activated carbon” or “biological carbon” or “biomass” or “charcoal”) and TS=(“microorganism” or “microbe” or “microbiology” or “microbial” or “bacteria” or “germ” or “tiny organism”) and TS=(“alkali saline” or “alkali soil” or “alkaline land” or “alkaline soil” or “alkali saline soil” or “alkali salinity” or “coastal saline

soil” or salin* or alkali* or “salt affected land” or “salt alkali soil” or “salt alkaline soil” or “salty soil” or “seashore saline land”), CNKI 数据库检索式设为 SU=(盐碱地+盐碱土壤+土地盐碱化+盐渍土+滨海盐土)*(修复+改善+治理+恢复)。通过制定严格的去重、标题/摘要及全文三级筛选标准,并依据引用频次、期刊影响力及研究深度等多维度指标,从初始检索文献中遴选出本领域的核心文献。检索时间跨度为 2018—2024 年,共检索到 3 533 篇英文文献和 1 187 篇中文文献(图 2a)。分析表明,关于盐碱地改良领域国内外研究的文献年发文量呈现逐年上升趋势,WOS(图 2b)年度发文量逐年攀升,2021 年后增长斜率明显加大,饼图显示中国发文占比最大,美国、印度等次之。同时累计被引近年快速抬升,显示该议题已进入高关注与高扩散阶段。近 3 a 中国与部分亚洲国家的增长更为显著,说明应用导向与工程化课题(如盐碱地改良、生物炭与微生物联合调控)在亚洲农业-环境场景中快速拓展。CNKI 国内年度发文亦稳步上升,并在 2021 年后出现阶梯式放大(图 2c)。



注:a为功能性微生物协同生物炭改良盐碱地研究文献数据收集流程图;b和c分别为基于WOS核心数据库和CNKI数据库出版物总量及前10位机构出版物比例。

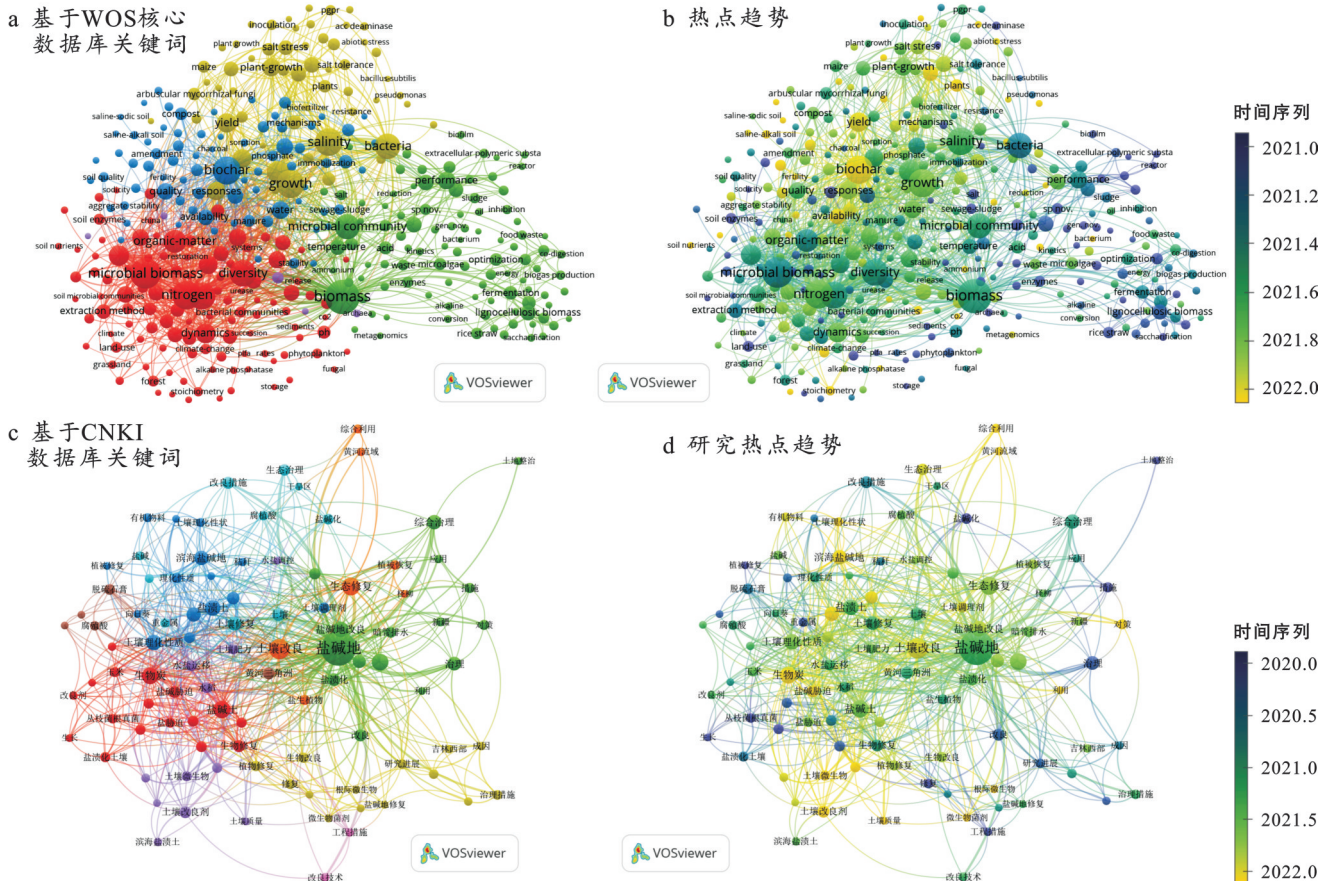
图 2 文献数据收集及出版信息

Fig.2 Collection of literature data and publication details

采用 VOSviewer 软件分析 Web of Science 核心数据库 (WOS), 绘图设置关键词最低出现频率为 20, 得到 352 个高频关键词 (图 3a, 3b), 设置 CNKI 数据库关键词最低出现频率为 5, 得到 97 个高频关键词 (图 3c, 3d)。

综合 WOS 与 CNKI 数据库的关键词共现与时间演化结果可以看出, 盐碱地治理与生物炭-微生物相关研究经历了由理化改良措施与生态机制探索, 逐

步发展到材料功能化、微生物群落调控及区域综合治理的演进过程。研究热点主要涵盖土壤有机质转化与碳氮循环、生物炭改性与土壤质量提升、植物-微生物互作及盐胁迫缓解机制以及废弃物资源化与能源转化。早期研究偏重土壤理化性质与改良剂应用, 中期逐渐转向生物炭与植物修复结合, 近年则聚焦于 PGPR 等功能微生物、区域尺度生态治理 (如黄河流域) 及废弃物资源化利用。



注: 本图由 VOSviewer 绘制时间叠加视图, 采用年份小数化连续时间模型, 以 1 个完整公历年记为 1.0 时间单位。图例中色条为年度连续刻度, 其中“.0”代表年初, “.5”代表年中; 小数部分不指代公历月份。

图 3 基于 WOS 核心数据库关键词 (a) 和研究热点趋势 (b) 与基于 CNKI 数据库关键词 (c) 和研究热点趋势 (d)
Fig.3 Keywords (a) and hotspot trends (b) based on WOS core collection, and keywords (c) and research hotspot trends (d) based on CNKI database

值得注意的是, 尽管生物炭在盐碱地改良中发挥着积极作用, 然而部分研究指出其存在潜在负面效应, 例如生物炭制备过程中可能携带的多环芳烃、重金属等污染物若未经充分处理, 易对土壤生态系统造成二次伤害; 此外, 过量施用高 pH 值生物炭可能进一步加剧碱性土壤的碱化问题。另一方面, 生物炭对不同类型的盐碱土壤存在显著差异化响应, 在黏性土壤中, 生物炭主要通过改善团粒结构、提高孔隙度缓解板结; 而在砂质土壤中, 则侧重增强保水保肥能力, 但其对盐分离子的吸附固定效果可能因土壤质地而异, 这一差异在当前研究中尚未得到系统评估,

未来需结合土壤与离子特异性进行精细化的调控。对比中外研究差异, 国际研究强调机理探索与跨学科拓展, 关注微生物过程、生物炭功能化及清洁能源转化; 而国内研究则突出工程措施与区域战略结合, 体现出应用导向与政策驱动特征。未来研究将沿着“材料功能化—微生物精准调控—区域综合治理—碳中和战略衔接”的路径持续深化, 展现出由基础研究到工程实践的多维度融合趋势。

2 盐碱地的生物改良机理

微生物改良盐碱地的作用机制涉及对土壤理化

性质的调节、植物生长的促进以及植物抗逆性的增强等方面。常用的微生物改良手段包括施用微生物菌剂、微生物肥料,或通过构建复合微生物群落实现协同改良^[24]。微生物菌剂通过多途径改善盐碱土壤环境与作物生长条件^[25],其核心机制是通过固氮和有机质分解提高氮及可溶性磷、钾含量,将难溶性矿物转化为可吸收养分,并分泌有机酸、多糖及生长促进物质,降低土壤盐碱度、增强有机质积累和改善结构稳定性^[26]。部分耐盐碱功能菌(如固氮菌和溶磷菌)不仅能够优化土壤养分供应,还可与植物根系形成互利共生体系,增强植物在盐胁迫条件下的养分吸收与抗逆能力,进而有效促进作物生长并推动盐碱土

壤的生态修复^[27]。耐盐碱功能菌株通过多维度协同机制构建起高效生态适应体系,例如,*Halomonas*和*Bacillus*等耐盐菌可利用 Na^+/H^+ 逆向转运蛋白系统,实现胞内离子稳态,并分泌胞外多糖固定根际 Na^+ ;解磷菌*Pseudomonas*则通过分泌有机酸中和碱性离子、活化磷素;而固氮菌与蓝藻能显著提升土壤氮含量。在土壤结构方面,耐盐真菌*Aspergillus*等可通过其代谢产物及菌丝网络促进团聚体形成并提升阳离子交换量。表1系统总结了这些功能微生物的核心作用机制及其代表性菌株。此外,微生物-植物互作还能协同激活植物的抗氧化酶系统,构建起从离子平衡到生态改良的多级防护体系(图4)。

表1 盐碱地改良中常见功能微生物的作用机制与效果

Table 1 Mechanisms and effects of common functional microorganisms in saline-alkali land improvement

菌株类型	代表属/种	主要作用机制	改良效果
固氮菌/蓝藻	根瘤菌,鱼腥藻	通过固氮酶将大气中的氮气(N_2)转化为氨(NH_3),供植物吸收	提高土壤总氮含量20%~35% ^[28]
耐盐碱细菌	<i>Halomonas</i> , <i>Bacillus</i>	表达 Na^+/H^+ 逆向转运蛋白(如nhaA基因),实现胞内 Na^+ 外排与 K^+ 吸收;分泌胞外多糖(EPS)固定 Na^+	维持细胞 K^+/Na^+ 比值 $\geq 5:1$;降低根际游离 Na^+ 浓度 ^[29]
解磷菌	<i>Pseudomonas</i>	分泌柠檬酸、草酸等有机酸,溶解磷酸盐,同时中和 $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$ 碱性离子	提升土壤有效磷含量;降低根际pH值 ^[30]
耐盐真菌	<i>Aspergillus</i>	分泌漆酶等转化有机质为腐殖酸;菌丝网络促进土壤团聚体形成	使土壤阳离子交换量(CEC)提升2~3倍 ^[31]
嗜盐菌	<i>Salinivibrio</i>	激活氯代谢通道,降低土壤中可溶性氯离子含量	降低表层土壤可溶性盐含量 ^[32]

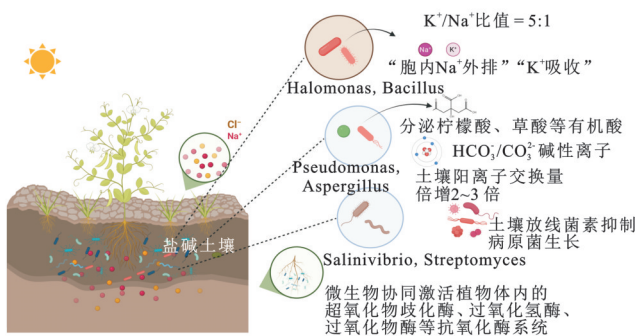


图4 微生物改良盐碱地机理

Fig.4 Mechanisms of microbial improvement of saline-alkali land

基于此,微生物改良已从依赖传统分离筛选,发展为结合宏基因组学直接解析不可培养微生物的耐盐基因簇(如nhaA, otsA),并开始利用CRISPR/Cas等基因编辑手段定向强化菌株的盐碱耐受性与定殖效率,从而显著提升了生物改良的精准性与有效性。

3 生物炭改良盐碱地效应机制与生态调控途径

3.1 生物炭的特性及其改良机制

生物炭是通过在缺氧条件下热解动植物残体制

得的碳质材料,其孔隙结构和比表面积受制备方法和原料的影响^[33]。热解温度从300℃升至700℃,可使木质生物炭的比表面积从约50 m²/g急剧增大至300 m²/g以上,同时微孔容积增加逾5倍。然而,高温虽能提升孔隙率,却减少了表面羧基等酸性官能团,并增加了灰分中CaO, MgO等碱性组分(灰分含量由5%增至20%以上),导致生物炭pH值升高^[34-35]。高比表面积和孔隙率有利于改善土壤通气性与保水能力;丰富的表面官能团(如羟基、羧基,含量可达1.5~4.5 mmol/g)赋予其调节土壤pH和离子交换的能力(CEC可达10~50 cmol/kg);所含的K, Ca, Mg, P等矿质元素(总量可达100 g/kg)可补充土壤养分。此外,其自身具有一定的导电性,可作为天然电子导体,为土壤微生物间的直接电子传递提供通道,从而显著增强微生物群落的代谢效率与协同作用^[36]。在改良过程中,生物炭通过孔隙结构改善土壤通气性和透水性,其表面官能团(如羧基和酚羟基)可通过吸附交换氢离子或氢氧根离子以调节土壤pH值。它还能吸附钠离子等阳离子,降低土壤盐分;同时解吸钾、铵等养分离子,实现缓释供肥;并可固定磷元素,减少流失,在作物生长过程中逐步释

放^[37]。以往研究指出,生物炭在一定浓度范围内增加了土壤养分含量,提高了根际土壤酶活性,改变微生物群落结构与代谢,促进微生物与植物相互作用,缓解盐碱胁迫^[38]。

生物炭改良盐碱地主要通过物理、化学与生物三重机制协同作用。在物理层面,生物炭具备高比表面积与丰富孔隙,可显著优化土壤结构,提升通气性与保水能力;化学机制表现为缓冲土壤 pH 值、提高阳离子交换容量,并促进有机质积累,从而改善土壤养分环境;生物作用机制是生物炭为微生物提供了良好的栖息环境和营养来源,增加了微生物的数量和多样性,改善微生物的群落结构,增加了土壤酶活性,有助于作物的吸收利用。

3.2 生物炭的生态风险与改性调控策略

常规生物炭在盐碱地改良方面可能具有一定局限性。例如,碱性生物炭的使用可能导致土壤 pH 值进一步升高,加剧碱化,影响微生物信号传递,降低 NH_4^+ , Fe, Mn, Zn 等养分的有效性,甚至活化某些重金属(如 Cr),增加生态风险;若灰分中含可溶性盐(如 K^+ , Na^+)^[39],还可能加重盐渍化。其次,生物炭作为外源添加物,其应用潜藏多维生态风险,对微生物生态安全的扰动值得关注。首先,生物炭自身可能是污染物的载体,若原料为畜禽粪便、污泥等,其在热解过程中易富集重金属(如 Cu, Cd)^[40];制备温度与控制条件不当也可能形成多环芳烃、环境持久性自由基等有机污染物,直接对土壤微生物产生毒害,抑制其活性并导致群落结构向耐污型演替^[41]。其次,生物炭的输入可能改变土壤中现有污染物的环境,例如低温生物炭因溶解性有机碳含量较高,可能通过竞争络合或解吸作用,活化土壤中原有的重金属(如 Cu, Cd),增强其对微生物的胁迫。此外,生

物炭虽能固持盐分离子,但其强吸附性也可能“锁闭”土壤中农药、抗生素等有机污染物,干扰土著微生物的降解过程,抑制氮磷循环相关功能基因的表达。在生态层面,外源功能菌剂的引入虽旨在强化修复功能,但可能与土著微生物在养分、生态位上形成激烈竞争,过度优势定殖可能导致本地物种多样性下降与微生物网络结构失衡。在砂型盐碱地中,生物炭可能破坏土壤团聚结构,增强风力侵蚀,吸附有限养分造成竞争,甚至微小颗粒迁移可能带来地下水污染风险。

总体而言,应选择低温制备的中性或低 pH 生物炭,控制施用量,并配合有机肥或酸性改良剂使用^[42]。相比之下,改性生物炭在盐碱地改良中展现出更大优势。经酸改性后,生物炭的 pH 值可从 10.0 降至 6.5~7.5;负载铁氧化物等改性方法能将其对 Na^+ 的吸附容量从 20 mg/g 提升至 50 mg/g^[43]。相较于普通生物炭,磁性生物炭能额外使盐碱土壤的淋溶速率提高 15%~25%,阳离子交换容量提升 10%~20%,进而更显著地促进作物生长^[44]。未来需综合考虑更多潜在影响因素以提升生物炭改良盐碱土壤的效果。

生物炭改性可以通过精准调控其表面性质,从而引导微生物群落组装与功能表达。表 2 中,不同改性策略各具特点,酸/氧化改性通过增加含氧官能团和降低 pH 值,为微生物创造适宜定殖的化学环境;金属/矿物负载在增强盐离子吸附的同时,其导电性提升,促进了微生物间的电子传递;物理活化通过大幅增加比表面积,主要从物理空间维度优化微生物栖息环境;而生物改性则通过预负载功能菌株实现“精准接种”。这些方法通过物理富集、化学趋化与能量代谢等多维度协同,共同驱动微生物群落的定向组装,最终实现土壤生态功能的精准提升。

表 2 生物炭主要改性策略的优缺点与应用可行性

Table 2 Advantages, disadvantages and application feasibility for main modification strategies of biochar

改性方法	机制与优势	劣势与风险	应用可行性
酸/氧化改性	增官能团(-COOH, -OH), 提交换容量; 降 pH 值, 适碱性土	强酸腐蚀孔隙, 存在残留风险	高 ^[43]
金属/矿物负载	特异性吸附 Cl^- ; 增强导电性, 促进电子传递	金属浸出毒性; 成本较高	中 ^[36]
物理活化/球磨	大幅增加比表面积; 无化学残留, 绿色	改变化学性质有限; 能耗高	高 ^[44]
生物改性	预负载功能菌, “接种”效率高	菌剂稳定性差; 竞争关系复杂	中低 ^[46]

3.3 微生态调控与抑盐机理

生物炭的孔隙结构不仅是物理栖息地,更是一个复杂的微生态环境,直接影响着微生物的群落结构、空间分布和功能。生物炭的多孔结构可以通过微观界面互作,精准调控微生物的定殖与代谢。生物炭的孔径分布(微孔 $< 2 \text{ nm}$, 介孔 $2 \sim 50 \text{ nm}$, 大孔

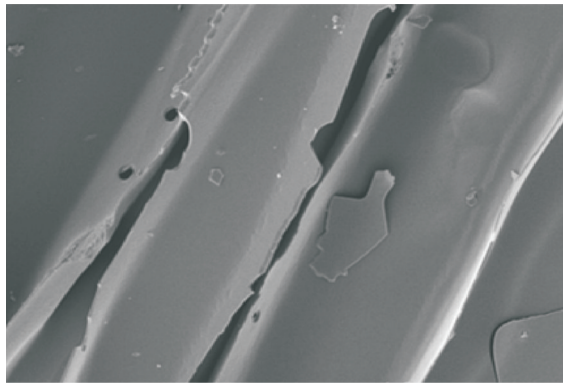
$> 50 \text{ nm}$)构成了第一道物理选择屏障。细菌细胞通常介于 $0.2 \sim 2 \mu\text{m}$ 之间,无法进入微孔和大部分介孔,主要定殖于大孔和部分较大的介孔中^[45]。这种尺寸匹配性决定了生物炭的孔隙结构对微生物群落具有选择性富集作用。其大孔和介孔凭借尺寸匹配效应和表面粗糙度为微生物提供物理锚定点与抵御

环境胁迫的微庇护所,SEM图像清晰地呈现了微生物在孔隙内部的富集现象(图5)。另外,巨大的比表面积可有效吸附营养物质及信号分子,形成局部“营养热点”,同时其导电性介导了微生物间的直接电子传递,显著增强代谢效率^[46-47]。因此,生物炭不仅是微生物的物理栖息地,更是调控群落结构与功能活性的微生态反应器。

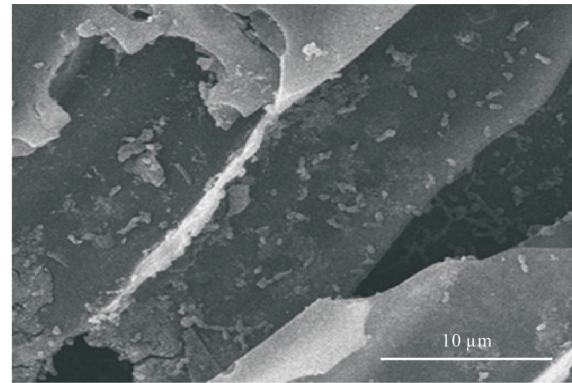
微生物分泌的胞外多糖(EPS)通过物理阻塞与化学作用双重机制抑制盐分迁移。其高分子凝胶网

络可有效堵塞土壤毛细管和生物炭孔隙,阻隔水分上行路径。

在分子层面,EPS富含的羧基(-COOH)、羟基(-OH)等负电官能团通过离子交换(如 Na^+ 与 H^+ / Ca^{2+} 交换)和络合作用特异性吸附 Na^+ ,将其固定于生物膜基质中。同时,EPS增加土壤溶液黏度,减缓盐分扩散。这种微观层面的物理封堵与分子固定协同作用,有效破坏了盐分随水分上升的毛细通道,从根本上抑制了表土盐分积累^[48]。



a 微生物定殖前生物炭



b 菌株Martellella sp.定殖后生物炭

图5 棉秆生物炭的SEM图像

Fig.5 SEM images of cotton stalk biochar

4 微生物-生物炭协同改良体系的构建与应用

4.1 协同增效的多维度互作机制

微生物协同生物炭改良盐碱地主要涉及物理结构改善、化学环境调节、生物功能强化等作用机制(图6)。

(1) 物理结构改善。生物炭的多孔结构为微生物提供栖息空间,可缓解高盐、高pH对微生物的直接胁迫;生物炭增强土壤透气性和保水性,改善微环境,促进微生物的生长和活动;生物炭表面负载的有机碳可作为缓释碳源,支持寡营养型微生物生长,丰富土壤微生物群落组成。

(2) 化学环境调节。生物炭通过表面官能团吸附 Na^+ , Cl^- 等离子,降低土壤溶液渗透压和电导率。若生物炭原料本身含有大量可溶性盐(如畜禽粪便、污泥等)或呈强碱性,则短期内可提升土壤盐度和pH,存在加剧盐碱化的风险,故需依据土壤本底性质审慎选择原料与施用量。生物炭的碱性可中和酸性盐碱土,或通过吸附作用缓解强碱性土壤的负面影响。生物炭负载的有机碳和矿质养分逐步释放,可与微生物代谢协同提升土壤肥力^[49]。

(3) 生物功能强化。功能微生物(如耐盐根瘤

菌、解磷菌、产胞外多糖菌等)通过固氮、溶磷、分泌有机酸等作用,促进盐分淋洗和养分活化;外源功能菌群的引入可能与土著微生物发生养分和生态位竞争,但生物炭所提供的多样化微栖息域有助于缓此类竞争,促进共生与功能互补,驱动群落向有益方向演替^[50]。生物炭的导电性可介导微生物间的直接电子传递。有研究表明^[51-52],生物炭可通过激活群体感应信号(AHLs总量提升约2.7倍)显著强化种间电子传递过程,具体表现为促进胞外聚合物分泌(TEPS从31.51 g/L增至52.41 g/L)并增强其电子交换能力(INT-ETS活性提升约21%),同时富集活性菌群如*Geobacter*(相对丰度从2.21%增至4.91%)和*Methanosaeta*(从54.69%增至55.60%),从而系统优化胞外呼吸过程,加速还原性代谢反应(如反硝化、硫酸盐还原),此外,生物炭可促进微生物分泌EPS,并通过其高分子凝胶网络堵塞土壤毛细管,物理阻隔盐分随水分上行,同时EPS富含的羧基、羟基等官能团通过离子交换与络合作用特异性吸附并固定 Na^+ ,使根际游离钠离子浓度显著降低,有效抑制表土盐分积累。这些协同作用可显著降低土壤中盐分和毒素的浓度,结合生物炭对土壤保水保肥能力的改善效应,有效增强了植物-微生物共生系统的稳定性与生态功能。

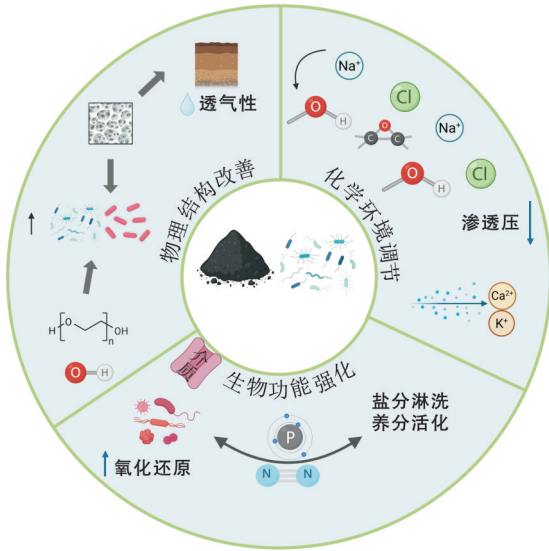


图 6 微生物协同生物炭改良盐碱地机制
 Fig.6 Mechanisms of microbial synergy with biochar in saline-alkali land improvement

4.2 关键影响因素与四维调控策略

微生物协同生物炭改良盐碱地的效果受多种关键因素调控(图 7)。

(1) 生物炭特性。木质类生物炭孔隙率高,盐分含量低,利于吸附盐分和微生物定殖;秸秆类生物炭矿质养分丰富但孔隙易塌陷,需改性提升稳定性;低温生物炭吸附能力强,高温生物炭稳定性高但吸附能力较差;酸/碱改性或负载纳米材料可增强生物炭离子交换能力。原料选择是控制盐分引入风险的关键,宜选用低盐木质原料,避免使用粪肥、污泥等高盐物料。

(2) 微生物种类与活性。需根据具体环境选用特定功能菌种,如高盐环境选用嗜盐菌,耐盐菌和固氮菌需与土壤类型匹配;外源功能菌与土著微生物的共生、竞争关系直接影响修复进程,可通过配施有机肥缓解初期养分竞争,并选用本土化功能菌剂提升定殖成功率,需动态监测与评估。

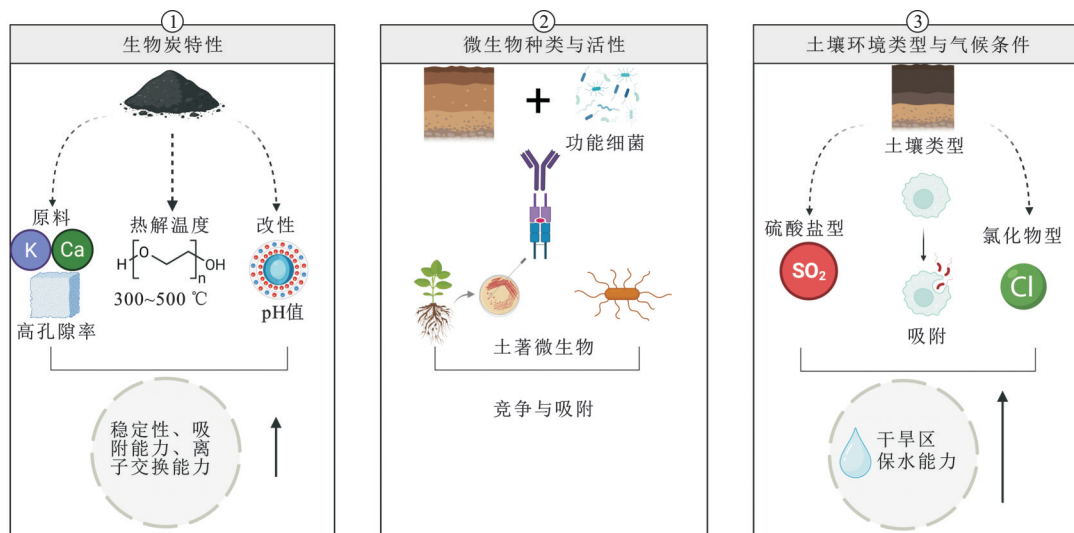


图 7 微生物协同生物炭改良效果影响因素
 Fig.7 Influencing factors of improvement effectiveness of microbial synergy with biochar

(3) 土壤环境与气候条件。硫酸盐型盐碱土宜采用 Fe^{3+} 改性生物炭联合硫酸盐还原菌,氯化物型盐碱土需用阴离子交换树脂改性生物炭;干旱区生物炭可保水,但应避免深层施用;季风区生物炭可延缓盐分表聚,但需防止菌剂流失。实现高效的微生物-生物炭协同改良,需建立“材料-菌种-环境-管理”四维调控体系:原料适配,根据盐碱类型选择生物炭原料与改性方法;功能强化,开发耐盐基因工程菌与智能响应型生物炭;精准施用,结合物联网传感器网络实时监测土壤参数,指导精准施用;风险管控,建立健全生物炭-微生物制剂的生态安全标准。

4.3 应用现状与发展趋势

微生物协同生物炭改良盐碱地在不同区域已展现出良好效果。在中国滨海地区,采用真菌衍生生物炭联合耐盐细菌,显著提升了根际微生物多样性、酶活性及植物生化指标,有效促进了盐碱地修复进程^[53];在中国亚热带地区,微生物改性生物炭与矮竹联用显著改善了土壤酸碱度、盐分和养分,优化了微生物群落结构,同时提升了植物抗氧化能力和生物量,促进了盐碱土改良和植物生长^[54];同时,土著功能菌与生物炭的结合显著提升了土壤肥力,其中生物炭有效促进了微生物定殖,协同效应突出^[55]。在

印度,稻秸生物炭结合细菌-蓝藻固定技术有效改善了土壤理化性质(如磷酸盐溶解性、电导率、pH值、总有机碳含量等),强化了改良效果^[56]。此外,生物炭与化学药剂的组合修复可调节土壤pH、电导率,促进土壤团聚体形成,提升土壤氮磷含量及酶活性,有助于改善微生物群落结构,促进作物健康生长^[21,57]。

微生物协同生物炭改良盐碱地技术已有较多应用研究,但其改良效能的长期稳定性及相关技术仍需进一步优化。未来的发展趋势主要集中在以下几个方面。

(1) 优化组合与定制化方案。深入探究不同微生物菌株、生物炭原料及制备工艺(如改性处理)对改良效果的影响,开发针对特定盐碱类型(如硫酸盐型、氯化物型)和环境条件的定制化改良方案。

(2) 协同机理深化。深入研究微生物与生物炭在微观尺度的互作机制,包括孔隙定殖选择性、电子传递过程及其对土壤微生物群落结构与功能基因(如氮循环相关基因)的影响,从分子层面完善理论框架。

(3) 推动区域适配与技术融合。开展多区域、多类型盐碱地的田间验证与适用性评价,推进该技术与植物修复、智慧农业(如精准灌溉与土壤监测)等体系的集成,推动盐碱地治理从单一修复向综合利用(如安全农产品生产与生态养殖)转型。

5 结论

微生物-生物炭联合改良技术是一种绿色、可持续的盐碱地治理策略,通过整合微生物的代谢活性与生物炭的物理化学特性,可显著提升土壤改良效果。一方面,生物炭的多孔结构和优良吸附性能可有效改善土壤理化环境;另一方面,功能微生物通过代谢活动驱动盐分转化与养分循环过程。二者协同作用不仅可以改善土壤结构与微生态功能,还能显著提升土壤肥力并促进植物生长,该技术在实验室与田间试验中均表现出良好的应用潜力。然而,需注意生物炭的潜在负面效应,如原材料来源及热解条件可能导致生物炭中残留重金属或多环芳烃等污染物,施用量过高可能影响土壤透气性与微生物活性;此外,生物炭在黏性土壤中可能加剧排水障碍,而在砂质土壤中则因吸附力强导致养分滞留,影响作物利用。微生物-生物炭联合改良技术仍面临菌剂稳定性不足、成本控制及长期生态风险不确定等挑战。

参考文献(References)

[1] 吕航,赵月,龚绪龙,等.我国滨海盐碱地改良技术综述

及案例研究[J].水文地质工程地质,2025,52(2):25-43.

Lü Hang, Zhao Yue, Gong Xulong, et al. Summary and case study on improvement technology of coastal saline-alkali land in China [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2025,52(2):25-43.

[2] 冯起,尹鑫卫,朱猛,等.统筹推进西北地区盐碱地综合治理利用:现状、挑战与对策建议[J].中国科学院院刊,2024,39(12):2060-2073.

Feng Qi, Yin Xinwei, Zhu Meng, et al. Promoting comprehensive management and utilization of saline-alkali land in northwest China as a whole: Current situation, challenges and countermeasures [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024,39(12):2060-2073.

[3] 黄婷,李媛,甘泉峰,等.生物基复合改良剂对滨海盐渍土综合地力的提升作用[J].水土保持通报,2022(4):99-106.

Huang Ting, Li Yuan, Gan Quanfeng, et al. Improvement of comprehensive soil fertility of coastal saline soil by bio-based compound improver [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022(4):99-106.

[4] 孙文倩,张新军,刘帆,等.盐碱地土壤水肥盐动态调控机制与技术研究进展[J].世界科技研究与发展,2025,47(1):24-36.

Sun Wenqian, Zhang Xinjun, Liu Fan, et al. Research progress on dynamic regulation mechanism and technology of soil water, fertilizer and salt in saline-alkali land [J]. World Sci-Tech R & D, 2025,47(1):24-36.

[5] 张贵芹,王洪章,郭新送,等.有机物料投入对滨海盐碱地土壤理化性状和夏玉米产量形成的影响[J].作物学报,2024,50(9):2323-2334.

Zhang Guiqin, Wang Hongzhang, Guo Xinsong, et al. Effects of organic materials input on soil physical and chemical properties and summer maize yield formation in coastal saline-alkali land [J]. Acta Agronomica Sinica, 2024,50(9):2323-2334.

[6] 宋玉凤,肖辉,张慧,等.基于盐碱地研究的可视化分析及改良技术的研究进展[J].环境生态学,2025,7(1):65-75.

Song Yufeng, Xiao Hui, Zhang Hui, et al. Research progress of visualization analysis and improvement technology based on saline-alkali land research [J]. Environmental Ecology, 2025,7(1):65-75.

[7] Fu Jiahui, Liu Yawen, Liu Xiaochen, et al. Screening of saline-alkali tolerant microorganisms and their promoting effects on rice growth under saline-alkali stress [J]. Journal of Cleaner Production, 2024,481:144176.

[8] 刘俊青,刘淼,梁正伟.有机肥施用改良盐碱地及其作用机理[J].土壤与作物,2024,13(3):340-347.

Liu Junqing, Liu Miao, Liang Zhengwei. Application of

- organic fertilizer to improve saline-alkali land and its mechanism [J]. *Soil and Crop*, 2024, 13(3): 340-347.
- [9] 杨婷, 姜永晴, 周璐璐, 等. Fe^- 耐盐功能菌群联用对盐碱地的改良效果[J]. *环境工程学报*, 2025, 19(5): 1153-1165.
Yang Ting, Jiang Yongqing, Zhou Lulu, et al. Improvement effect of Fe^- salt-tolerant functional flora on saline-alkali soil [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2025, 19(5): 1153-1165.
- [10] 廖乐琴, 李婷, 尉贇, 等. 盐胁迫对不同品种甘薯幼苗根系的影响[J]. *绿色科技*, 2025, 27(5): 83-89.
Liao Leqin, Li Ting, Yu Fang, et al. Effects of salt stress on roots of different sweet potato seedlings [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2025, 27(5): 83-89.
- [11] 乔艳辉, 亓玉昆, 王月海, 等. 黄河三角洲次生怪柳退化林更替改造模式分析评价[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(6): 370-376.
Qiao Yanhui, Qi Yukun, Wang Yuehai, et al. Analysis and evaluation on replacement models of secondary *Tamarix chinensis* degraded forest in Yellow River delta [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(6): 370-376.
- [12] 王洲胜. 北方地区林木关键与配套种植技术的应用与案例成果分析[J]. *种子世界*, 2025(5): 189-191.
Wang Zhousheng. Application and case analysis of key and supporting planting techniques of forest trees in northern China [J]. *Seed World*, 2025(5): 189-191.
- [13] 高放, 洪煜, 孙燕, 等. 秸秆还田对盐碱地土壤有机碳库及其组分影响的研究进展[J]. *华北农学报*, 2024, 39(增刊1): 143-149.
Gao Fang, Hong Yu, Sun Yan, et al. Progress of research on the effect of straw return on soil organic carbon pools and its fractions in saline-alkali soils [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2024, 39(S1): 143-149.
- [14] 王志刚, 史广志, 刘志都, 等. 盐碱障碍土壤生态治理与综合利用技术进展[J]. *中国农学通报*, 2025(8): 98-104.
Wang Zhigang, Shi Guangzhi, Liu Zhidu, et al. Technical progress of ecological control and comprehensive utilization of saline-alkali obstacle soil [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2025(8): 98-104.
- [15] 李雨胶, 周永明, 史岩鹏, 等. 盐碱地作物高效生产技术标准研制现状及展望[J]. *标准科学*, 2024(S2): 41-48.
Li Yujiao, Zhou Yongming, Shi Yanpeng, et al. Development status and prospect of technical standards for efficient production of crops in saline-alkali land [J]. *Standard Science*, 2024(S2): 41-48.
- [16] 程永钢, 金辉, 郑普山, 等. 间作绿肥对盐碱地土壤改良及青贮玉米产量的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2024(5): 1100-1110.
Cheng Yonggang, Jin Hui, Zheng Pushan, et al. Effects of intercropping green manure on soil improvement and silage corn yield in saline-alkali land [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2024(5): 1100-1110.
- [17] 韩笑晨, 张贵芹, 王亚辉, 等. 土壤调理剂对滨海盐碱地土壤盐分含量及夏玉米产量的影响[J]. *作物学报*, 2024, 50(7): 1776-1786.
Han Xiaochen, Zhang Guiqin, Wang Yahui, et al. Effects of soil conditioner on soil salt content and summer maize yield in coastal saline-alkali land [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(7): 1776-1786.
- [18] 冯玉倩, 米俊珍, 赵宝平, 等. 秸秆配施微生物菌肥对盐碱地土壤及作物盐分含量的影响[J]. *华北农学报*, 2023, 38(6): 101-107.
Feng Yuqian, Mi Junzhen, Zhao Baoping, et al. Effect of straw combined with microbial fertilizer on salt content of soil and crops in saline alkali land [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2023, 38(6): 101-107.
- [19] 邱阳, 王亚俊, 张玉宝, 等. 添加不同类型和数量的生物炭对盐碱地土壤及其盐离子和微生物群落的影响[J]. *科学*, 2025, 28(4): 112285.
Qiu Yang, Wang Yajun, Zhang Yubao, et al. Effects of adding different types and amounts of biochar to saline alkali soil on its salt ions and microbial community in northwest China [J]. *Science*, 2025, 28(4): 112285.
- [20] 姚祥, 李晓慧, 沈泽宇, 等. 不同暖季型草坪草品种对盐碱地土壤理化性质和微生物群落的影响[J]. *植物资源与环境学报*, 2024, 33(1): 59-66.
Yao Xiang, Li Xiaohui, Shen Zeyu, et al. Effects of different warm-season turfgrass varieties on soil physical and chemical properties and microbial community in saline-alkali soil [J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2024, 33(1): 59-66.
- [21] 张鹏, Bing 雪, 焦 磊, 等. 改良沿海盐碱地土壤的球磨红磷负载生物炭[J]. *化工学报*, 2022, 43(1): 1339-1344.
Zhang Peng, Bing Xue, Jiao Le, et al. Amelioration effects of coastal saline-alkali soil by ball-milled red phosphorus-loaded biochar [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 43(1): 1339-1344.
- [22] 李叶琪, 张齐强, 王兴东, 等. 胞外多糖产生盐耐受细菌和生物炭促进葡萄在盐碱胁迫下的生长[J]. *环境技术与创新*, 2025, 38: 104070.
Li Yeqi, Zhang Qiqiang, Wang Xindong, et al. The synergistic effect of extracellular polysaccharide-producing salt-tolerant bacteria and biochar promotes grape growth under saline-alkaline stress [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2025, 38: 104070.
- [23] 吴齐聪, 宁 珂, 刘 斌, 等. 生物炭和 *Piriformospora indica* 改善沿海盐碱地土壤质量并促进牧草生长[J]. *植物科学前沿*, 2024, 15: 1434097.
Wu Qicong, Ning Ke, Liu Bingqian, et al. Co-application of biochars and *Piriformospora indica* improved the quality of coastal saline soil and promoted the growth of forage [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1434097.
- [24] 蔡树美, 诸海焘, 俞晓梅, 等. 土壤盐分含量对设施蔬菜根际微生物群落结构的影响[J]. *土壤通报*, 2024, 55(5): 1453-1461.

- Cai Shumei, Zhu Haitao, Yu Xiaomei, et al. Effect of soil salt content on microbial community structure in rhizosphere of protected vegetables [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(5):1453-1461.
- [25] 曹巍,高惠嫣,王鑫鑫,等.不同配施肥措施对滨海盐碱地大豆生长和产量的影响[J].江苏农业科学,2023,51(22):53-60.
- Cao Wei, Gao Huiyan, Wang Xinxin, et al. Effects of different fertilization measures on growth and yield of soybean in coastal saline-alkaline land [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(22):53-60.
- [26] Li Min, Li Wenjie, Wang Chunxue, et al. Growth-promoting effects of self-selected microbial community on wheat seedlings in saline-alkali soil environments [J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2024, 12:1464195.
- [27] 陈燕鸿,蔺红苹,徐苏琪,等.植物根际促生菌的筛选及其耐盐促生效果[J].微生物学报,2025,65(1):150-168.
- Chen Yanhong, Lin Hongping, Xu Suqi, et al. Screening of plant growth promoting rhizobacteria and its effect of salt tolerance and growth promotion [J]. Acta Microbiologica Sinica, 2025, 65(1):150-168.
- [28] 张婷,宗可金,季银利,等.黄河三角洲典型植被下真菌群落结构组成[J].微生物学报,2025,65(2):808-827.
- Zhang Ting, Zong Kejin, Ji Yinli, et al. Structures of fungal communities in soil of typical plants in the Yellow River Delta [J]. Acta Microbiologica Sinica, 2025, 65(2):808-827.
- [29] 邢硕,邹荣松,李素艳,等.耐盐碱根际微生物在盐碱地生态修复中的应用[J].世界林业研究,2024,37(5):28-34.
- Xing Shuo, Zou Rongsong, Li Suyan, et al. Application of saline-alkali tolerant rhizosphere microorganisms in ecological restoration of saline-alkali land [J]. World Forestry Research, 2024, 37(5):28-34.
- [30] 蒋尚伯,孙大元,沈会芳,等.Tn5转座子插入 α -酮戊二酸脱氢酶基因sucA对香蕉细菌性软腐病菌毒力的影响[J].微生物学通报,2025,52(5):2107-2122.
- Jiang Shangbo, Sun Dayuan, Shen Huifang, et al. Effect of Tn5 transposon inserting α -ketoglutarate dehydrogenase gene sucA on virulence of banana bacterial soft rot pathogen [J]. Microbiology China, 2025, 52(5):2107-2122.
- [31] 王敬宽,高枫舒,张楷悦,等.禾本科绿肥还田对盐碱地棉田土壤碳氮及微生物量碳氮的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2023,31(3):396-404.
- Wang Jingkuan, Gao Fengshu, Zhang Kaiyue, et al. Effects of Gramineae green manure returning on soil carbon and nitrogen and microbial biomass carbon and nitrogen in cotton fields in saline-alkali land [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(3):396-404.
- [32] 汪恩旭,曾一帆,李振轮,等.兼性好氧反硝化嗜盐菌海杆菌属W-8的脱氮性能及其机制[J].微生物学报,2025,65(4):1812-1823.
- Wang Enxu, Zeng Yifan, Li Zhenlun, et al. Nitrogen removal performance and mechanism of facultative aerobic denitrifying *Halophilic bacteria* W-8 [J]. Acta Microbiologica Sinica, 2025, 65(4):1812-1823.
- [33] 杨梦楠,孙晗,曹海龙,等.生物炭-壳聚糖磁性复合吸附剂的制备及去除地下水中铅和铜[J].岩矿测试,2023,42(3):563-575.
- Yang Mengnan, Sun Han, Cao Hailong, et al. Preparation of biochar-chitosan magnetic composite adsorbent and its removal of lead and copper from groundwater [J]. Rock and Mineral Analysis, 2023, 42(3):563-575.
- [34] Chambers C, Grimes S, Smith R C, et al. Investigation of adsorption parameters of saxitoxin onto loblolly pine-derived biochar synthesized at various pyrolysis temperature [J]. Chemosphere, 2025, 370:143965.
- [35] 吴丹,孙萍,路鹏展,等.浒苔生物炭对滨海盐碱土壤改良的效果及途径[J].环境科学,2020,41(4):1941-1949.
- Wu Dan, Sun Ping, Lu Pengzhan, et al. Effect and approach of enteromorpha prolifera biochar to improve coastal saline soil [J]. Environmental Science, 2020, 41(4):1941-1949.
- [36] Wang Mingwei, Zhao Zhiqiang, Zhang Yaobin. Magnetite-contained biochar derived from Fenton sludge modulated electron transfer of microorganisms in anaerobic digestion [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 403:123972.
- [37] 赵雪,赵欣鑫,赵佐平,等.秸秆生物质炭处理重金属废水研究现状及展望[J].生态毒理学报,2024,19(1):31-39.
- Zhao Xue, Zhao Xinxin, Zhao Zuoping, et al. Research status and prospect of treating heavy metal wastewater with straw biomass charcoal [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2024, 19(1):31-39.
- [38] 兰宇,孟军,韩晓日,等.生物炭基产品及其对土壤培肥改良效应的研究进展[J].植物营养与肥料学报,2024,30(7):1396-1412.
- Lan Yu, Meng Jun, Han Xiaori, et al. Research progress of biochar-based products and their effects on soil fertility improvement [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2024, 30(7):1396-1412.
- [39] Frontiers Editorial Office. Retraction: Combined effect of Zinc lysine and biochar on growth and physiology of wheat (*Triticum aestivum* L.) to alleviate salinity stress [J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15:1441705.
- [40] Wang Jun, Hao Xiaoxia, Liu Zile, et al. Biochar

- improves heavy metal passivation during wet anaerobic digestion of pig manure [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, 28(1):635-644.
- [41] Alharbi H A, Alotaibi K D, EL-Saeid M H, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and metals in diverse biochar products: Effect of feedstock type and pyrolysis temperature [J]. *Toxics*, 2023, 11(2):96.
- [42] Tang Chong, Yang Jingsong, Yang Chihao, et al. Response of soil properties and water use efficiency to straw-based amendments and irrigation rates in a saline soil [J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 391:126459.
- [43] Grafmüller J, Schmidt H P, Kray D, et al. Biochar acidification increased sorption and reduced leaching of nitrate [J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 393:127224.
- [44] 张慧, 赵杰, 李梦琦, 等. 改性生物炭作用滨海盐碱地的土壤微生物机理 [J]. *华北农学报*, 2024, 39(3): 159-165.
Zhang Hui, Zhao Jie, Li Mengqi, et al. Soil microbial mechanism of modified biochar in coastal saline-alkali land [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2024, 39(3):159-165.
- [45] Cai Taiyi, Wang Zhigang, Guo Chengshi, et al. Effects of biochar and manure co-application on aggregate stability and pore size distribution of vertisols [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(18):11335.
- [46] Cui Changzheng, Shen Jiamin, Zhu Yi, et al. Bioremediation of phenanthrene in saline-alkali soil by biochar-immobilized moderately *Halophilic bacteria* combined with *Suaeda salsa* L [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 880:163279.
- [47] Valentin M T, Luo Gang, Zhang Shicheng, et al. Direct interspecies electron transfer mechanisms of a biochar-amended anaerobic digestion: A review [J]. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 2023, 16(1):146.
- [48] Hu Rui, Chen Xue, Han Yule, et al. KOH-modified biochar enhances nitrogen metabolism of the chloroquine phosphate-disturbed anammox: Physical binding, EPS modulation and versatile metabolic hierarchy [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2025, 482:136467.
- [49] Wen Yuqiang, Wu Ruotong, Qi Dandan, et al. The effect of AMF combined with biochar on plant growth and soil quality under saline-alkali stress: Insights from microbial community analysis [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2024, 281:116592.
- [50] Li Yanni, Yang Runya, Pan Yinghua, et al. Mechanisms of biochar effects on plant growth of seepweed (*Suaeda salsa*) and hybrid sorrel (*Rumex patientia* × *Rumex tianschanicus*) in a coastal saline soil over two cropping seasons: Soil-plant-microbe interactions [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2023, 23(1):569-580.
- [51] Li Yu, Fan Chenlong, Liu Lingsen, et al. Biochar-induced quorum sensing enhances methane production by strengthening direct interspecies electron transfer [J]. *Bioresource Technology*, 2025, 434:132845.
- [52] Zhang Pengfei, Jiang Ziwei, Wu Xiaodong, et al. Effects of biochar and organic additives on CO₂ emissions and the microbial community at two water saturations in saline-alkaline soil [J]. *Agronomy*, 2023, 13(7):1745-1764.
- [53] Zhao Zirun, Liu Lin, Sun Ying, et al. Combined microbe-plant remediation of cadmium in saline-alkali soil assisted by fungal mycelium-derived biochar [J]. *Environmental Research*, 2024, 240:117424.
- [54] Huang Zichen, Bian Fangyuan, Wang Zhigao, et al. Microorganisms facilitated the saline-alkali soil remediation by biochar: Soil properties, microbial communities, and plant responses [J]. *Land Degradation & Development*, 2024, 35(11):3567-3578.
- [55] Liang Shuang, Wang Shengnan, Zhou Lulu, et al. Combination of biochar and functional bacteria drives the ecological improvement of saline-alkali soil [J]. *Plants*, 2023, 12(2):284.
- [56] Sharma A, Maurya N, Singh S K, et al. Investigation on synergetic strategy for the rejuvenation of Cr (VI) contaminated soil using biochar-immobilized bacteria and cyanobacteria consortia [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(2):112034.
- [57] Yu Chunxiao, Wang Guangmei, Zhang Haibo, et al. Biochar and nitrification inhibitor (dicyandiamide) combination had a double-win effect on saline-alkali soil improvement and soybean production in the Yellow River delta, China [J]. *Agronomy*, 2022, 12(12): 3154-3169.