土 壤 学 报
Acta Pedologica Sinica
DOI:10.11766/trxb202503050101 CSTR: 32215.14.trxb202503050101
李光杰，于震，王冲，施卫明，王昭月，李彦，张琳，刘兆辉. 盐碱地作物“根际适生微域”理论架构与技术路径思考[J]. 土壤学报, 2026,
LI Guangjie, YU Zhen, WANG Chong, SHI Weiming, WANG Zhaoyue, LI Yan, ZHANG Lin, LIU Zhaohui. The Theoretical Framework and Technical Pathway of "Rhizosphere Suitable Microzones" for Crops in Saline-Alkali Soils [J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

盐碱地作物“根际适生微域”理论架构与技术路径思考*

李光杰[1]，于 震[1]，王 冲[2]，施卫明[3]，王昭月[3]，李 彦[1]，张 琳[1]，刘兆辉[1†]

（1. 养分资源高效利用全国重点实验室/山东省农业科学院农业资源与环境研究所，济南 250100；2. 中国农业大学资源与环境学院/国家农业绿色发展研究院/养分资源高效利用全国重点实验室，北京 100193；3. 土壤与农业可持续发展全国重点实验室(中国科学院南京土壤研究所)，南京 211135）

摘 要：盐碱地是一种重要的农业土地资源。近年来，中国在盐碱地治理方面采取了多种改良措施并取得了重要进展。然而，盐碱地改良和利用依然面临成本高、水资源严重制约的问题，且改良后的盐碱地稳定性差、易反复，低耗水、高效率的技术支撑有待加强。针对上述重大问题，提出盐碱地作物“根际适生微域”学术思路，围绕盐碱地作物“出苗难、立地难”的问题，与整体改土策略相对，阐释盐碱地作物“根际适生微域”(RSM) 理论框架，即在植物根系范围微小空间，人为建造与周围环境有所不同的特定局部环境，具备独特的物理、化学和生物特征，能够支持特定的生物群落或生命活动。拟通过土壤培肥增碳降盐、养分均衡供应抑盐、物理结构优化消板、根际生物功能强化等多理论交叉创新，提出“活土促根、离子养根、酸化调根、生物护根”为核心的技术路径构建设想，系统描绘“根际适生微域”构建原理和技术路径的探索。以耐盐高值作物品种为先锋，通过水分调控促进根际钠离子的运移，并思考以新型缓控释肥料为核心，辅以抗盐、促生和生物强化因子的盐碱地作物“根际适生微域”技术路径，文章指出了作物“根际适生微域”与盐碱地改良研究的重点方向与内容，以期推动盐碱地改良技术瓶颈突破和相关学科发展。

关键词：根际适生微域；活土促根；离子养根；酸化调根；生物护根；缓控释肥料
中图分类号：S156.4 **文献标志码：**A

The Theoretical Framework and Technical Pathway of "Rhizosphere Suitable Microzones" for Crops in Saline-Alkali Soils

LI Guangjie[1], YU Zhen[1], WANG Chong[2], SHI Weiming[3], WANG Zhaoyue[3], LI Yan[1], ZHANG Lin[1], LIU Zhaohui[1†]

(1. *State Key Laboratory of Nutrient Use and Management, Institute of Agricultural Resources and Environment, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan* 250100, *China*; 2. *College of Resources and Environmental Sciences / National Academy of Agriculture Green Development / State Key Laboratory of Nutrient Use and Management, China Agricultural University, Beijing* 100193, *China*; 3. *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 211135, *China*)

Abstract: Saline-alkali land is an important agricultural land resource, and in recent years, China has adopted various improvement measures for the management of saline-alkali soil. However, the improvement and utilization of saline-alkali land still face challenges, including high costs, severe water resource constraints, poor stability of improved saline-alkali land

*国家重点研发计划项目（2021YFD19001900）和泰山学者工程项目（tsqn202312287）资助 Supported by the National Key R&D Program of China (No. 2021YFD19001900), and the Taishan Scholars Program of Shandong Province, China (No. tsqn202312287)
† 通讯作者 Corresponding author，E-mail：nkyliuzhaohui@163.com
作者简介：李光杰（1984—），山东济南人，研究员，主要从事土壤养分高效和逆境调控研究。E-mail:ligjsaas@163.com
收稿日期：2025-03-05；收到修改稿日期：2025-07-03；网络首发日期（www.cnki.net）：

with a tendency to revert, and the need for enhanced low-water-consumption and high-efficiency technical support. To address these significant issues, this study proposes the concept of "rhizosphere suitable microzones" (RSM) for crops in saline-alkali soils. Focusing on the problems of "difficult emergence and establishment" of crops in saline-alkali land, as opposed to the overall soil improvement strategy, it expounds the theoretical framework of RSM. RSM refers to creating a specific local environment with unique physical, chemical, and biological characteristics within the small space of plant root systems, which differs from the surrounding environment and can support specific biological communities or life activities. This study proposes the technical path construction concept centered around "activating soil to promote root growth, using ions to nourish roots, acidification to regulate roots, and biological agents to protect roots". This will be achieved through cross-innovation of multiple theories, including soil fertility enhancement with carbon addition and salt reduction, balanced nutrient supply for salt inhibition, physical structure optimization to eliminate compaction, and enhancement of rhizosphere biological functions. Thus, it depicts the exploration of the construction principles and technical paths of RSM from a systematic perspective. This study outlines the key directions and contents of research on RSM and saline-alkali land improvement, aiming to break through the technical bottlenecks of saline-alkali soil improvement and promote the development of related disciplines. Specifically, the study considers salt-tolerant high-value crop varieties as pioneers, promotes the migration of sodium ions in the rhizosphere through water regulation, and considers the research and development of the technical path of RSM for crops in saline-alkali soils. This is centered on new slow and controlled-release fertilizers supplemented by anti-salt, growth-promoting, and biological strengthening factors.

Key words: Rhizosphere suitable microzones; Activating soil to promote root growth; Ion regulation to nourish roots; Acidification adjustment to modulate roots; Biological enhancement to protect roots; Slow and controlled-release fertilizers

土壤盐碱化已成为制约全球农业可持续发展与生态环境稳定的关键因素，我国盐碱化土地总面积超 9 913 万 hm^2[1-3]。在盐分胁迫作用下，土壤有效养分含量显著降低，植物生长遭受严重渗透胁迫与离子毒害，同时土壤生物多样性锐减，团粒结构遭到不可逆破坏[4-6]。近年来，我国通过多部门协同攻关，集成生物改良、化学调控、农业综合开发及工程治理等技术体系[7-10]，在盐碱地治理方面取得重要阶段性成果。然而，当前改良模式仍面临多重技术瓶颈：治理周期长、经济成本高，水资源匮乏严重限制治理规模；改良后土壤盐分极易反弹，且缺乏低耗水、高效率的技术解决方案[4, 11-13]。传统工程、农艺及化学改良措施多采用全域改土策略，通过对整个土体或耕层进行系统性改造实现盐碱治理，但其高成本、长周期的特性难以满足大规模推广需求。根际作为作物-土壤交互作用的核心微生态单元[14-16]，其环境调控对盐碱地生态修复具有重要意义。构建适配盐碱地的根际微环境调控策略，可有效实现“地-种”协同优化，不仅能充分挖掘盐碱地生产潜力，还可显著改善区域生态环境质量。因此，本研究系统综述盐碱地治理领域研究进展，深入剖析种质资源创新、养分精准管理、抗盐耐瘠机制及生物功能强化的协同作用机理，创新性提出“根际适生微域”学术概念，构建盐碱地作物“根际适生微域”理论框架。同时，围绕耐盐高值作物品种选育、根际钠离子动态调控，以新型缓控释肥料为核心，集成抗盐、促生及生物强化功能因子的技术路径，开展深入探讨，旨在突破盐碱地改良技术瓶颈，为相关学科发展提供理论与技术支撑。

1 盐碱地治理主要理论和技术进展与挑战

目前，盐碱地传统治理遵循“淡化表层、防治返盐，培肥耕层、提升地力”的技术路线，治理措施主要涵盖四大体系：（1）工程治理手段：通过修筑排灌基础设施、实施土地平整作业，构建完善的灌溉排水体系，实现土壤盐分的高效淋洗与排出，并对地下水位进行精准调控，这是从根本上改善盐碱地土壤环境的关键路径[17-18]；（2）农艺改良方法：采用科学灌溉模式、开展深耕深松作业、增施有机肥料及推行秸秆还田技术，持续优化土壤结构与肥力水平，降低土壤盐碱含量，为农作物

生长创造适宜条件[19-21]；（3）化学调控措施：利用化学改良制剂直接作用于土壤，通过中和或转化土壤盐分，快速调整土壤化学性质[22-23]；（4）生物修复策略：通过种植耐盐植物、栽培耐盐绿肥及牧草，施用有益微生物菌剂，借助生物代谢活动改善土壤生态环境，增强土壤自我修复功能，达成盐碱地生态化治理目标[24-25]。2023 年中国共产党中央财经委员会第二次会议明确提出，需深入挖掘盐碱地综合利用潜力，推进现有盐碱耕地改造升级；坚持因地制宜原则，以“以种适地”（聚焦耐盐品种选育的生物策略）与“以地适种”（围绕降盐、控盐、排盐的工程策略）相结合的方式，高效开发盐碱地资源。

基于“淡化表层、防治返盐，培肥耕层、提升地力”的治理思路，我国在盐碱地治理领域取得显著进展。在黄海及环渤海地区滨海盐渍土治理中，创新构建“一核三类六策”治理方略[26-29]。该方略以有机碳管理为核心，优化秸秆还田有机质转化效率；针对轻、中、重度盐碱地实施差异化策略，统筹外源碳投入与内部循环提质；通过秸秆高效还田、化学-有机改良剂协同、生物强化制剂施用、多水源精准调配、耕作制度优化及冬季绿色覆盖等六项措施，实现盐碱地生态修复与产能提升。在黄河中上游灌区盐碱土治理中，针对河套灌区次生盐碱化问题，研发“三控三提”技术模式[30]，通过快速营建淡化沃层实现“控水提质”，利用粉垄与暗管系统促进盐分排出，达成“控盐提产”，结合盐肥与水肥精准调控实现“控肥提效”，显著改善区域土壤质量[18, 31-33]。在东北苏打盐碱土治理中，形成“以稻治碱”为主导的综合技术体系，通过耐盐碱水稻品种选育，耦合脱硫石膏、腐植酸等化学改良剂及灌排工程措施，辅以大水泡田淋盐技术，形成苏打盐碱地改良的有效范式[34]。在西北绿洲盐碱土治理中，新疆地区推广的膜下滴灌排盐技术，结合高经济价值耐盐植物种植，实现盐分快速削减与经济效益提升[35]。在黄淮海平原插花盐碱土治理中，基于区域水盐运移规律，构建井灌井排系统，并配套抗盐碱作物新品种，有效缓解当地土壤盐碱化问题[36]。

尽管治理成效显著，但现有技术仍存在一定局限性。当前盐碱地改良多聚焦于脱盐排盐，工程、农艺、化学及生物措施虽广泛应用，却面临成本高、周期长、效果不稳定等难题，亟需理论与技术创新[7]。工程措施受水资源制约明显，干旱半干旱地区水资源短缺，严重限制规模化治理进程[37]；长期滴灌引发的盐分累积问题加剧治理复杂性[38]。农艺措施的实施需大量人力、物力投入。化学改良剂虽能快速改善土壤结构，但高分子产品成本高昂、效果波动大，且存在二次污染风险。生物改良技术则因见效缓慢难以满足短期治理需求。此外，盐碱地治理后若缺乏持续性维护，极易出现返盐返碱现象[20, 39]。传统技术存在一定局限，而现代改良技术与产品发展滞后，低耗水、高效能工程与农艺技术研发迟缓，优质改良产品供给不足[1]，这些均成为制约盐碱地治理技术突破的关键瓶颈。

2 盐碱地作物“根际适生微域”的理论架构

盐碱土壤因腐殖质含量匮乏、黏粒矿物组成特殊，导致土壤团聚体稳定性差、孔隙连通性不足，极易发生板结现象[39-41]。在播种后灌溉或强降雨作用下，土壤颗粒快速分散并重新排列，于表层形成致密且高强度的板结层，致使种子的顶土阻力较正常土壤增加 3 倍~5 倍。与此同时，种子及幼苗根系周围土壤中过高的盐分浓度（尤其是钠离子、氯离子的过量积累），通过渗透胁迫导致细胞失水，以及离子毒害破坏细胞膜完整性和酶活性，严重干扰种子萌发过程中的激素平衡、呼吸代谢和物质转化，显著降低根系活力，削弱根部细胞的有氧呼吸效率。这种双重胁迫效应致使大田作物出苗率普遍低于 30%，常出现大面积缺苗断垄、幼苗生长迟缓等问题，极大限制了作物产量提升与品种遗传潜力挖掘。“出苗难、立地难”已成为制约盐碱地高效生产的核心瓶颈。

传统盐碱地改良中，工程、农艺及化学等措施多采用全域改土策略，通过对整个土体或耕层进行系统性改造以缓解盐碱危害，但该模式存在成本高昂、周期漫长等弊端。根际作为作物根系与盐碱土壤相互作用的核心微生态单元[14, 42]，其环境调控对盐碱地治理具有重要意义。相较于传统全域改土模式，优先构建适合种子萌发与根系生长的根际微环境，可通过局部精准调控显著降低改良成

本，同时快速提升盐碱地生物产量，为后续土壤改良提供有机碳资源。基于此，形成了“根际适生微域”（Rhizosphere suitable microzones，RSM）理论架构，即通过人为干预在植物根系周围微小空间内，构建区别于整体盐碱环境、适宜作物生长的局部微域。该微域通过物理结构优化（如增加孔隙度）、化学性质调控（如将 pH 稳定在 7.0~8.0，盐分含量降低 20%~30%）及生物组成调节（富集有益微生物群落），使其在物理、化学和生物特征方面显著区别于周边盐渍化土壤，能够有效保障作物生长指标达到正常水平的 80%以上，从根源上解决“出苗难、立地难”问题。此外，“根际适生微域”可通过根系分泌物介导的碳氮循环和微生物代谢活动，促进作物与土壤间的良性互作，在提升作物抗逆性的同时，改善土壤质量。因此，深入探究“根际适生微域”的互作增效机制，优化养分利用效率与作物盐碱耐受性，构建系统化技术路径，有望扭转盐碱地高耗低效的生产现状，成为推动盐碱地治理向绿色可持续方向转型的突破口。

3 盐碱地作物“根际适生微域”理论和技术路径的构建与探索

本文紧扣轻中度盐碱化土壤高效利用的关键科学问题，融合土壤培肥增碳降盐、养分均衡供应抑盐、物理结构优化消板及根际生物功能强化等多学科理论，创新构建“根际适生微域”理论架构。该架构从土壤-植物-微生物多层级互作机制出发，系统阐释“根际适生微域”构建原理，致力于突破作物对盐碱环境适应性瓶颈，提出涵盖“活土促根、离子养根、酸化调根、生物护根”的学术思路与技术路径构想（图 1）。

图 1 盐碱地作物“根际适生微域”的理论架构和技术路径

Fig. 1 Theoretical framework and technical pathways of the "rhizosphere suitable microzones" for saline-alkali land crops

3.1 活土促根的学术思路及技术路径思考

活土促根理论以秸秆、有机肥、生物质炭及微生物菌剂协同培肥为核心，基于根际土壤沃化机制[43-45]，通过秸秆还田、秸秆降解菌剂与机械耕作耦合，实现耕层扩容与结构优化。该理论旨在提升根际土壤团聚体稳定性，促进有机-铁复合物形成，抑制有机碳矿化；通过增加稳定有机碳与活性矿物含量，驱动有机-矿物胶体复合物在根际界面富集。研究表明，外源有机物料添加可调控细菌介导的铁还原过程，促进黏土矿物转化，从而系统性解决根际盐碱土壤盐分胁迫、结构硬化、有机质匮乏及氮素库容不足等问题，构建根际有机质快速积累与土壤可持续改良的生态修复体系。

在技术路径构建方面，生物有机肥与微生物肥料协同施用是关键策略。生物有机肥凭借高有机质含量，通过抑制土壤氨挥发与氮素淋溶，显著提升土壤肥力[46]。其作用机制包括增强土壤团聚体稳定性、促进有机-铁复合物形成、延缓有机碳矿化进程，进而提升土壤有机碳固存效率。例如，研究证实有机肥可促进土壤胶体界面有机-矿物复合物生成，是提高盐碱稻田有机碳储量的有效措施[10, 47]。微生物肥料中的功能菌群（如固氮菌、解磷菌、解钾菌及根瘤菌等）通过定殖根际土壤，分解有机物质并释放速效养分，显著增强植物养分吸收效率。此外，微生物通过分泌植物激素、抗生素等代谢产物，促进根系发育并抑制病原菌生长，为后续酸化调根、生物护根技术的实施奠定物质基础[4, 25, 48]。例如，相较于单施化肥，蚓粪（3.75 $t \cdot hm^{-2}$）配施可使土壤盐分降低 5.6%，促进氮素矿化，重塑根际团聚体微观结构与细菌群落，使玉米根系生物量增加 38%[49]。

3.2 离子养根的学术思路及技术路径思考

离子养根理论以根层离子均衡供应、淡化根层盐分、降钠促根为核心[50-51]。通过筛选耐盐作物品种并优化密植模式，扩大地上部群体覆盖与根系分布面积，协同提升蒸腾调节能力与养分吸收效率；基于 Ca^{2+} /Na^{+} 平衡抑盐机制，利用钙镁离子调控盐渍土壤根际钠离子迁移，结合多元肥料配施，实现根层养分精准调控；耦合腐植酸、脱硫石膏施用与灌溉系统优化，靶向解决根际钠离子富集、养分有效性低等问题，系统性强化土壤-根际-根系-叶部功能协同。

在技术路径构建方面：（1）根际水分精准调控。依据“盐随水移”原理，采用近根区覆膜滴灌技术，结合新型保水材料应用，实现“根际湿润体”局部聚水保墒，有效降低盐分离子浓度，达成淡化根际、降钠养根的目标。（2）根际包膜控释肥料研发与施用。针对传统肥料在盐碱环境下快速释放，易引发盐分胁迫的问题，依托包膜控释技术创新，开发以氮磷钾为核心肥芯，内层包裹抗盐新材料（如有机高分子聚合物、改性黏土），外层负载土壤结构改良剂（如腐植酸、生物质炭）的新型肥料产品。该肥料通过延缓养分释放，减少盐分对根系的直接胁迫，同步改善根际微区孔隙结构与水肥保持能力。结合根系或种子接触式施肥策略，通过种肥混播与精准定量施用，确保养分定向供给。此外，缓控释肥内核包裹的氮素养分应以铵态氮为核心，例如，适量增铵可使土壤钠离子浓度降低 23%~29%，钠吸附比（SAR）降低 16%~34%，而且缓释态铵肥可在根际微区精准缓慢释放，均衡土壤盐分离子，通过根际微域的缓慢释放机制，实现盐分离子均衡调控与根系促生的双重效应[52-54]。

3.3 酸化调根的学术思路及技术路径思考

酸化调根理论基于根际肥盐阴阳平衡原理，聚焦“铵-钠”拮抗关系，以土壤高 pH 与低磷有效性为阴，硫酸铵诱导酸化、解磷增钙降钠为阳[55]。通过以硫酸铵替代尿素等氮源，定向酸化作物根际微域，促进磷酸钙/镁盐溶解，提升钙镁离子活性，强化根际土壤胶体对钠离子的置换作用，显著提高养分供应浓度。该理论针对盐碱土壤盐分高、地下水位浅、灌溉水矿化度高的特性，通过降低土壤碱性，减少淋洗钠离子所需水量，有效降低钠吸附比（SAR），实现根际盐分淡化与环境优化。

在技术路径构建方面，抗盐促生物质研发是核心策略。其一，选用石膏、硅酸盐矿物等土壤调理剂，通过钙离子与钠离子的离子交换反应，降低土壤钠盐含量，改善土壤渗透性与结构稳定性[19, 22]。将其与肥料协同施用，可同步实现养分供给与土壤环境改良，促进根系生长发育。其二，通过生物技术筛选和培育兼具抗盐性与高泌酸能力的植物品种，并开发高效抗盐促生剂，调节根系生理代谢，增强植物对盐碱环境的适应性。其三，基于植物根系分泌物（如氨基酸、维生素等），研发天然促生物质，优化根际微域生态环境。研究表明，相较于传统过量施肥模式，以硫酸铵替代 50% 尿素并减施磷肥，可使小麦根际土壤 pH 降低 0.08~0.24 单位，玉米根际 pH 降低 0.06~0.35 单位，玉米根际土壤 SAR 下降约 24.1%，冬小麦与夏玉米分别增产 5.4%和 1.5%[56]，验证了酸化调根技术的有效性与应用潜力。

3.4 生物护根的学术思路及技术路径思考

生物护根理论以土壤动物、菌根及根际耐盐促生菌为核心，聚焦植物-微生物互作机制，通过构建根际微生态对话体系提升植物耐盐性。该理论通过筛选功能互补、耐盐性能稳定的核心微生物菌群，协同施用植物源生物刺激剂（如海藻提取物、氨基酸、多糖等），调节植物生理代谢与抗逆响应，同时重塑根际微生物群落结构与功能活性，营造适宜植物生长的根际微生态环境[57-58]。结合耐盐碱作物种植，实现以根际调控为核心的抑盐改土目标，促进盐碱地生态修复与生产力提升。

在技术路径构建方面，主要包含五大核心策略：其一，针对微生物与作物适配性差的问题，系统筛选耐盐作物根际关键微生物类群，强化微生物-植物共生关系；其二，通过合成菌群设计，优化土著微生物群落结构，解决菌群内部竞争与互抑问题；其三，研发微生物功能强化材料，突破微生物增殖扩繁的环境限制；其四，以耐盐碱作物为载体，筛选适用于轻中度盐碱地的耐盐高值品种，构建“根际适生微域”。该路径通过增加地表覆盖、减少土壤蒸发返盐，改善根际土壤孔隙结构，并利用根系分泌的小分子有机酸中和土壤碱性，提升根际微生物生物量与活性，进而增强土壤肥力；

其五，将耐盐微生物菌群与耐盐作物进行原位协同应用，构建地上-地下互馈体系，实现作物耐盐性能强化与根际微生态功能提升的协同增效。

4 结论与展望

本文围绕盐碱地“出苗难、立地难”的关键问题展开深入探讨，创新性提出适用于轻中度盐碱地改良的作物“根际适生微域”理论。该理论旨在突破轻中度盐碱地从出苗到产能提升的技术瓶颈，为盐碱地的可持续高效利用提供系统性策略与技术路径。总之，以耐盐高值作物品种作为先锋物种，促使其在盐碱环境中优先扎根定植，为后续改良工作筑牢根基；通过精准的水分调控技术，驱动根际钠离子定向运移，实现根层土壤淡化与降钠养根的双重目标。新型包膜控释肥料是构建作物“根际适生微域”的核心技术（图 2），其以氮磷钾为肥芯，可满足作物全生育期的养分需求；内层采用抗盐新材料，能够有效抵御盐分胁迫，保障肥料的稳定释放；外层包裹土壤结构改良剂，可逐步破除根际土壤板结，显著增强土壤透气性与透水性，重塑根际土壤微观结构。同时，辅以生物有机肥与微生物肥料协同施用。在施用技术上，采用根系或种子接触式精准施肥法，使肥料高效作用于作物根系周围，大幅提升养分利用效率。以缓控释肥料为核心，整合抗盐、促生菌等强化因子，系统调控根际微域环境，营造适宜植物生长的根际“微生态气候”，以期在轻中度盐碱地上实现作物的理想产能，为盐碱地农业发展开辟新路径。

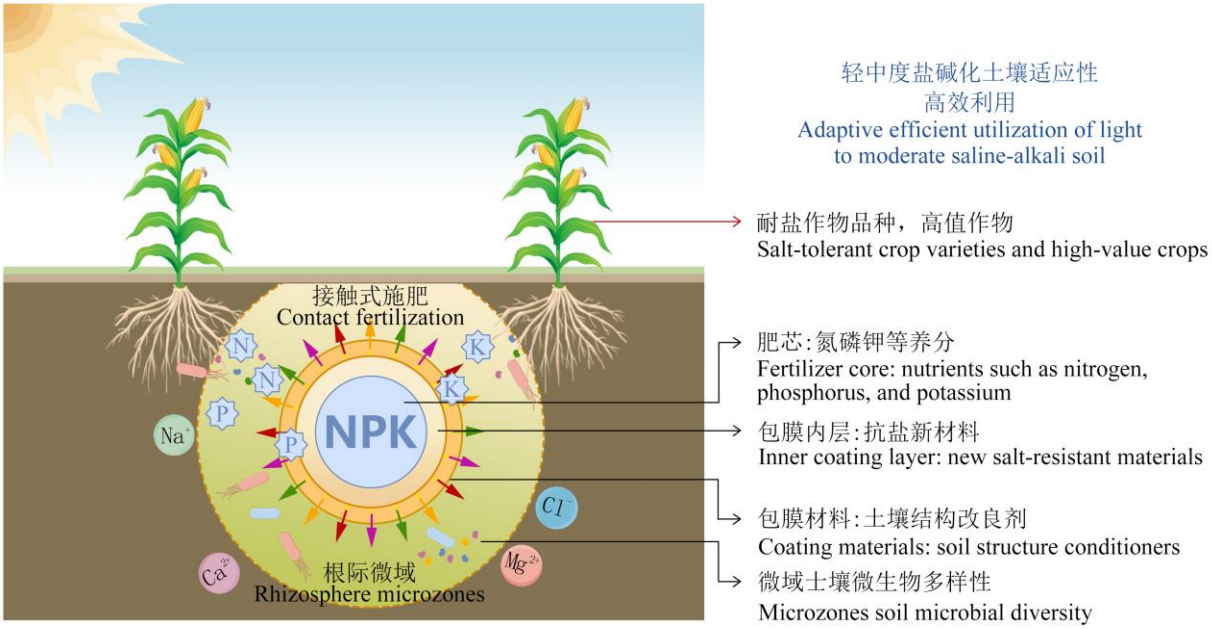

图 2 以缓控释肥料为核心的盐碱地“根际适生微域”构建技术路径思考

Fig. 2 The technical pathway of constructing the "rhizosphere suitable microzones" in saline-alkali soils with slow and controlled-release fertilizers as the core

综上所述，尽管现有盐碱地治理技术种类繁多，但在实际推广应用中，能被各地广泛接纳并实现大规模应用的技术仍较为匮乏。究其根源，主要在于治理成本高昂，多数地区面临较大的财政压力，难以支撑长期技术应用。由此可见，探索与区域经济发展水平相适配的低成本改良技术已成为当务之急[59]。同时，鉴于盐碱区域多为生态脆弱与敏感地带，盐碱地治理技术及产品的研发与应用，不仅需确保显著的改良效果，更要满足安全、绿色的环保要求，切实避免对耕地资源和生态环境造成污染与破坏[56]。因此，创新盐碱地作物“根际适生微域”抗盐增效理论，构建以包膜控释肥为核心的技术体系，通过调控根际微环境，有望撬动植物-土壤系统耐盐性与养分利用效率的整体提升，实现“四两拨千斤”的改良效果。该技术路径可有效促进盐碱地粮食安全保障、资源高效利用及生

态环境保护的多目标协同发展，不仅为我国盐碱地绿色开发提供新的理论与技术支撑，也为破解全球盐碱地改良发展难题提供了新思路。

未来盐碱地作物“根际适生微域”创新研究方向应主要聚焦于以下领域：

（1）解析养分-微生物-根际土壤互作机制：根际土壤的物理化学特性是驱动养分-微生物互作的关键基础。在盐碱地环境下，土壤结构劣化与持水能力下降等问题，严重威胁根际微域生态平衡。已有研究表明，根际微生物群落通过与植物根系的协同互作，显著增强植物养分吸收能力，形成“微生物-植物”协同效应[14]。因此，深入探究养分-微生物-根际土壤互作机制，是构建盐碱地根际适生微域的核心研究方向。后续研究需重点剖析不同植物-微生物协同模式，筛选耐盐高效微生物菌种，开发针对性土壤改良策略，为盐碱地生态修复与农业可持续发展提供理论支撑。

（2）研发根际适生微域调控产品：根际适生微域调控产品的研发，是提升盐碱地土壤质量、促进植物生长的关键路径。其中，缓控释肥料的创新研发尤为重要，需围绕包膜内层抗盐促生物质筛选、包膜外层土壤结构改良剂鉴定等核心环节，系统开展产品优化与创新。

（3）推进根际适生微域精准调控装备研发：盐碱地根际适生微域的精准调控与装备研发，是改善土壤环境、增强作物抗逆能力的重要技术保障。该方向主要涵盖根际微域环境实时监测、智能分析与精准调控技术，以及包膜控释肥精准施用装备的研发与应用。

参考文献（References）

[1] Yang J S. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 837-845.[杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 837-845.]

[2] Hassani A, Azapagic A, Shokri N. Global predictions of primary soil salinization under changing climate in the 21st century[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 6663.

[3] Hopmans J W, Qureshi A S, Kisekka I, et al. Chapter One-Critical knowledge gaps and research priorities in global soil salinity[J]. Advances in Agronomy, 2021, 169: 1-191.

[4] Zhao G M, Yang M Y, Chen S, et al. Saline-alkali land reclamation in China: Status, problems, and prospects[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2025, 48(1): 14-26.[赵耕毛, 杨梦圆, 陈硕, 等. 我国盐碱地治理：现状、问题与展望[J]. 南京农业大学学报, 2025, 48(1): 14-26.]

[5] Nosalewicz A, Lipiec J. The effect of compacted soil layers on vertical root distribution and water uptake by wheat[J]. Plant and Soil, 2014, 375(1/2): 229-240.

[6] Pereira P, Barceló D, Panagos P. Soil and water threats in a changing environment[J]. Environmental Research, 2020, 186: 109501.

[7] Wang G, Ni G, Feng G, et al. Saline-alkali soil reclamation and utilization in China: Progress and prospects[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2024, 11(2): 216-228.

[8] Ondrasek G, Rengel Z. Environmental salinization processes: Detection, implications & solutions[J]. Science of the Total Environment, 2021, 754: 142432.

[9] Yang J S, Yao R J. Management and efficient agricultural utilization of salt-affected soil in China[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2015, 30(Z1): 162-170.[杨劲松, 姚荣江. 我国盐碱地的治理与农业高效利用[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(Z1): 162-170.]

[10] Ma C, Ma L Y, Liu T X, et al. Research progress on saline land improvement technology[J]. World Forestry Research, 2010, 23(2): 28-32.[马晨, 马履一, 刘太祥, 等. 盐碱地改良利用技术研究进展[J]. 世界林业研究, 2010, 23(2): 28-32.]

[11] Zhang Y F, Li W Y, Hu H, et al. Current status and prospects of research on saline-alkali land improvement[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(18): 7-10.[张翼夫, 李问盈, 胡红, 等. 盐碱地改良研究现状及展望[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(18): 7-10.]

[12] Feng Q, Yin X W, Zhu M, et al. Overall promotion of integrated management and utilization of saline-alkali land in Northwest China: Conditions, challenges, and recommendations[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(12): 2060-2073.[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.]

[13] Ma K, Rao L Y. Research lineage hot spot analysis of soil salinization in China [J]. Journal of China Agricultural University, 2023,

28(11): 90-102.[马凯, 饶良懿. 我国土壤盐碱化问题研究脉络和热点分析[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(11): 90-102.]

[14] Shen J B, Bai Y, Wei Z, et al. Rhizobiont: An interdisciplinary innovation and perspective for harmonizing resources, environment, and food security[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(4): 805-813.[申建波, 白洋, 韦中, 等. 根际生命共同体：协调资源、环境和粮食安全的学术思路与交叉创新[J]. 土壤学报, 2021, 58(4): 805-813.]

[15] Jin K M, White P J, Whalley W R, et al. Shaping an optimal soil by root–soil interaction[J]. Trends in Plant Science, 2017, 22(10): 823-829.

[16] Zhang F S, Cao Y P. Dynamic processes in the rhizosphere and plant nutrition[J]. Acta Pedologica Sinica, 1992, 29(3): 239-250.[张福锁, 曹一平. 根际动态过程与植物营养[J]. 土壤学报, 1992, 29(3): 239-250.]

[17] Li Z J, Liu H G, Wang T G, et al. Deep vertical rotary tillage depths improved soil conditions and cotton yield for saline farmland in South Xinjiang[J]. European Journal of Agronomy, 2024, 156: 127166.

[18] Wang Q J, Wang W Y, Lv D Q, et al. Water and salt migration characteristics under drip irrigation in saline-alkali land[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000, 16(4): 54-57.[王全九, 王文焰, 吕殿青, 等. 膜下滴灌盐碱地水盐运移特征研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(4): 54-57.]

[19] Ren Z G, Zhu X Y, Han Q, et al. Preliminary study on improving technology of soda saline-alkali paddy field in Songyuan area[J]. Northern Rice, 2022, 52(4): 26-29.[任志国, 朱笑宇, 韩启, 等. 松原地区苏打盐碱水田改良技术初探[J]. 北方水稻, 2022, 52(4): 26-29.]

[20] Xu Y D, Zhang Y M. Experimental study on irrigation and salt leaching in saline-alkali land of Songyuan irrigation district[J]. Jilin Water Resources, 2013(6): 1-3.[许永德, 张彦明. 松原灌区盐碱地改良灌溉洗盐定额试验研究[J]. 吉林水利, 2013(6): 1-3.]

[21] Du Y Q, Liu X F, Zhang L, et al. Drip irrigation in agricultural saline-alkali land controls soil salinity and improves crop yield: Evidence from a global meta-analysis[J]. Science of the Total Environment, 2023, 880: 163226.

[22] Dong Y L, Tuo D B, Li B, et al. Field experiment study of the improvement of saline-alkali soil in Hetao irrigation area by different dosage of desulfurization gypsum and organic fertilizer[J]. Journal of Hainan Normal University (Natural Science), 2013, 26(3): 299-302.[董芸雷, 妥德宝, 李彬, 等. 脱硫石膏和有机肥不同施用量改良河套灌区盐碱化土壤田间试验研究[J]. 海南师范大学学报(自然科学版), 2013, 26(3): 299-302.]

[23] Liu R N, Liang B J, Zhao H L, et al. Impacts of various amendments on the microbial communities and soil organic carbon of coastal saline–alkali soil in the Yellow River Delta[J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 14: 1239855.

[24] Qin J Z, Qin Z F, Ni G, et al. Advances in the separate functions or cross-kingdom interactions of AMF and PGPR in enhancing plant salt tolerance[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2024, 50(7): 1354-1366.[秦敬泽, 秦泽峰, 倪刚, 等. AMF 和 PGPR 单独或“跨界”互作促进植物耐盐性的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 50(7): 1354-1366.]

[25] Ci D W, Qin F F, Tang Z H, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi restored the saline–alkali soil and promoted the growth of peanut roots[J]. Plants, 2023, 12(19): 3426.

[26] Tang C, Yang J S, Yao R J, et al. Effects of biochar and nitrification / urease inhibitors on soil salinity and crop nitrogen absorption and utilization in coastal saline soil[J]. Soils, 2021, 53(2): 291-298.[唐冲, 杨劲松, 姚荣江, 等. 生物质炭及硝化/脲酶抑制剂对滨海盐渍土土壤养分及作物氮素吸收利用的影响[J]. 土壤, 2021, 53(2): 291-298.]

[27] Liu M L, Wang C, Liu X L, et al. Saline-alkali soil applied with vermicompost and humic acid fertilizer improved macroaggregate microstructure to enhance salt leaching and inhibit nitrogen losses[J]. Applied Soil Ecology, 2020, 156: 103705.

[28] Wang Z T, Li T, Li Y Z, et al. Relationship between the microbial community and catabolic diversity in response to conservation tillage[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 196: 104431.

[29] Xu K P, Liu X B. Summary and exploration of saline-alkali land improvement plans in Hetao irrigation district[J]. Gansu Science and Technology, 2021, 37(1): 41-42.[许坤鹏, 刘喜兵. 河套灌区盐碱地改良方案总结与探索[J]. 甘肃科技, 2021, 37(1): 41-42.]

[30] Liu T. The control techniques of water-nutrient-salt and plant root in a saline-alkali wasteland of Ningxia irrigation area[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.[刘涛. 宁夏引黄灌区盐碱荒地水肥盐与植物根系调控技术研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.]

[31] Yin X W, Feng Q, Zheng X J, et al. Spatio-temporal dynamics and eco-hydrological controls of water and salt migration within and among different land uses in an oasis-desert system[J]. Science of the Total Environment, 2021, 772: 145572.

[32] Jin K M, Shen J B, Ashton R W, et al. Wheat root growth responses to horizontal stratification of fertiliser in a water-limited environment[J]. Plant and Soil, 2015, 386(1/2): 77-88.

[33] Mohanavelu A, Naganna S R, Al-Ansari N. Irrigation induced salinity and sodicity hazards on soil and groundwater: An overview of its causes, impacts and mitigation strategies[J]. Agriculture, 2021, 11(10): 983.

[34] Wu X H, Li J L, Xie L D, et al. Advances in amelioration technologies of sodic/saline sodic paddy fields of rice[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2025: 1-21.[吴绪海, 李家亮, 谢黎栋, 等. 苏打盐碱地水田治理技术研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2025: 1-21.]

[35] Gao N, Zhang S Z, Xi L Q, et al. Research on strategies to solve the shortage of forage in Xinjiang by grass cultivation on saline-alkali land[J]. Livestock in Caoshi, 2024(4): 49-54.[高宁, 张树振, 席琳乔, 等. 利用盐碱地种草解决新疆饲草短缺问题的对策研究[J]. 草市家畜, 2024(4): 49-54.]

[36] Chang Y C, Ge Y J, Cao Z Q. Analysis of the distribution characteristics and improvement practices of saline-alkali land in China[J]. Agricultural Disaster Research, 2025, 15(1): 244-246.[常跃畅, 葛亚军, 曹占强. 我国盐碱地分布特征及改良实践分析[J]. 农业灾害研究, 2025, 15(1): 244-246.]

[37] Lv H, Zhao Y, Gong X L, et al. Review of techniques and case studies for saline-alkali land amelioration in the coastal regions of China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(2): 25-43.[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.]

[38] Wang Q Z, Liu Q, Gao Y N, et al. Review on the mechanisms of the response to salinity-alkalinity stress in plants[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(16): 5565-5577.[王佺珍, 刘倩, 高娅妮, 等. 植物对盐碱胁迫的响应机制研究进展[J]. 生态学报, 2017, 37(16): 5565-5577.]

[39] Zhang C. Effects of AMF on root and microenvironment of glycyrrhiza under salt-alkali stress[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024.[张辰. 盐碱胁迫下 AMF 对甘草根系及根际微环境变化的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024.]

[40] Wang X C, Han P, Wang Y N, et al. Research progress on the effects of salt-alkali stress on plant physiology and rhizosphere soil microorganisms[J]. Seed Science and Technology, 2023, 41(23): 22-24.[王晓春, 韩鹏, 汪月宁, 等. 盐碱对植物生理及根际土壤微生物影响研究进展[J]. 种子科技, 2023, 41(23): 22-24.]

[41] Rich S M, Watt M. Soil conditions and cereal root system architecture: Review and considerations for linking Darwin and Weaver [J]. Journal of Experimental Botany, 2013, 64(5): 1193-1208.

[42] Wang X, Whalley W R, Miller A J, et al. Sustainable cropping requires adaptation to a heterogeneous rhizosphere[J]. Trends in Plant Science, 2020, 25(12): 1194-1202.

[43] Zhao X Y, Yu X F, Gao J L, et al. Improvement of saline–alkali soil and straw degradation efficiency in cold and arid areas using *Klebsiella* sp. and *Pseudomonas* sp.[J]. Agronomy, 2024, 14(11): 2499.

[44] Cui Q, Xia J B, Yang H J, et al. Biochar and effective microorganisms promote *Sesbania* cannabina growth and soil quality in the coastal saline-alkali soil of the Yellow River Delta, China[J]. Science of the Total Environment, 2021, 756: 143801.

[45] Chen L, Zhou G X, Feng B, et al. Saline-alkali land reclamation boosts topsoil carbon storage by preferentially accumulating plant-derived carbon[J]. Science Bulletin, 2024, 69(18): 2948-2958.

[46] Zuo W G, Xu L, Qiu M H, et al. Effects of different exogenous organic materials on improving soil fertility in coastal saline-alkali soil[J]. Agronomy, 2023, 13(1): 61.

[47] Dong X L, Wang J T, Tian L, et al. Review of relationships between soil aggregates, microorganisms and soil organic matter in salt-affected soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(3): 364-372.[董心亮, 王金涛, 田柳, 等. 盐渍化土壤团聚体和微生物与有机质关系研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2023, 31(3): 364-372.]

[48] Vacheron J, Desbrosses G, Bouffaud M L, et al. Plant growth-promoting rhizobacteria and root system functioning[J]. Frontiers in Plant Science, 2013, 4: 356.

[49] Liu M L, Cao J, Wang C, et al. Vermicompost enhances the salt tolerance of maize by reshaping the rhizosphere microenvironment[J]. Applied Soil Ecology, 2024, 203: 105633.

[50] Zhang F S, Romheld V, Marschner H. Release of zinc mobilizing root exudates in different plant species as affected by zinc nutritional

status[J]. Journal of Plant Nutrition, 1991, 14(7): 675-686.

[51] Arulmathi C, Porkodi G. Characteristics of coastal saline soil and their management: A review[J]. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 2020, 9(10): 1726-1734.

[52] Cheng J, Tang Y A, Zhu X Y, et al. Research progress on coated functional slow/controlled release fertilizers and their membrane materials[J]. Fine Chemicals, 2025, 42(1): 39-47.[成静, 唐雨昂, 朱星宇, 等. 包膜型功能缓控释肥及其膜材料研究进展[J]. 精细化工, 2025, 42(1): 39-47.]

[53] Yang J Y. Research progress and prospect of slow controlled release fertilizers[J]. Shandong Chemical Industry, 2023, 52(21): 109-111.[杨俊英. 缓控释肥的研究进展及展望[J]. 山东化工, 2023, 52(21): 109-111.]

[54] Zhai C J, Zhang J, Cui S Y, et al. Effects of slow/controlled release fertilizers on rice growth, yield, and quality under salt stress[J]. Crops, 2023(1): 143-151.[翟彩娇, 张蛟, 崔士友, 等. 盐逆境下缓/控释肥对水稻生长发育、产量和品质的影响[J]. 作物杂志, 2023(1): 143-151.]

[55] Ye J Q. Transport and transformation of nitrogen element in saline-alkali paddy soil[D]. Shanghai: Donghua University, 2012.[叶洁琼. 氮素在盐碱稻田中的迁移转化规律研究[D]. 上海: 东华大学, 2012.]

[56] Wang D X, Hao Z C, Li D D, et al. Induced decline of alkali and sodium content in the rhizosphere by applying ammonium containing fertilizer can increase the adaptation and yield of crops to salt-affected soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(1): 67-79.[王丁霞, 郝志诚, 李登登, 等. 增施铵态氮肥诱导滨海盐渍土作物根际降碱抑钠可实现以种适地增产增效[J]. 中国生态农业学报, 2025, 33(1): 67-79.]

[57] Zhang D S, Zhang C C, Tang X Y, et al. Increased soil phosphorus availability induced by faba bean root exudation stimulates root growth and phosphorus uptake in neighbouring maize[J]. New Phytologist, 2016, 209(2): 823-831.

[58] Ren H L, Zhang F Y, Zhu X, et al. Manipulating rhizosphere microorganisms to improve crop yield in saline-alkali soil: A study on soybean growth and development[J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 14: 1233351.

[59] Chen G, Ji H B, Lu C N, et al. Effects of combined application of urea and ammonium on rice yield, nitrogen utilization efficiency, and soil nutrients[J]. Soils, 2024, 56(1): 28-34.[陈贵, 纪涵博, 鲁晨妮, 等. 缓控释肥配施脲铵运筹对水稻产量、氮素利用效率和土壤养分的影响[J]. 土壤, 2024, 56(1): 28-34.]

（责任编辑：陈荣府）