



微生物肥料在盐碱土壤中的应用展望

鲁凯琦 金杰人 肖明*

上海师范大学生命科学学院 上海 200234

摘要: 随着土地资源日益短缺及人们对生态环境的关注,以天然土壤微生物为主要成分的微生物肥料应用在盐碱农业中越来越受到重视。本文综述了国内外微生物肥料的发展历史和现状,微生物肥料对盐碱土壤产生的影响,帮助植物抵抗盐胁迫的机制,以及对盐碱土壤中微生物群落产生的影响;本文也提出了两种能够有效保藏菌种的固定化方法,这两类方法能有效地解决菌种易失活问题且延长其在土壤中的作用时间;最后提出了目前微生物肥料作用于盐碱地存在的问题与展望,旨在为缓解土地资源、提高农业安全生产做出贡献。

关键词: 微生物肥料, 盐碱地, 影响, 固定化

Prospect of microbial fertilizer in saline soil

LU Kai-Heng JIN Jie-Ren XIAO Ming*

College of Life Sciences, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China

Abstract: People concern the ecological environment due to increasing shortage of land resources. The application of microbial fertilizers with natural soil microorganisms as the main component has attracted interests in farming on saline-alkali soil. This paper reviews the development and current status of microbial fertilizers worldwide. Moreover, we discuss the mechanisms how microbial fertilizers help plants resist salt stress and the effects on microbial communities in saline-alkali soils. We also propose two methods of immobilizing strains. These two methods can effectively solve the strains' inactivation and prolong their action time in the soil. Finally, the problems and prospects of the current microbial fertilizers acting on saline-alkali soils are addresses.

Keywords: Microbial fertilizer, Saline-alkali soil, Influences, Immobilized

粮食安全是基本的社会需求。预计未来 50 年全球人口将增至约 100 亿人,为了满足日益增长人口的粮食需求,在现有基础上粮食产量至少还需要提升 50%^[1]。土地这个人类赖以生存的资源正在变得越来越稀缺,这使得我们将目光投向了盐碱地这

一在世界上分布十分广泛却难以被我们有效利用的土地资源。全世界有 7 700 万 hm^2 的耕地受到盐离子影响^[2]。过量的盐浓度会导致土壤退化,改变土壤渗透和基质潜力,并降低土壤微生物活性。过量可交换 Na^+ 和高 pH 值会导致粘土膨胀和分散,

Foundation items: Shanghai 2016 Science and Technology Innovation Action Plan Project (16391902100); Ministry of Agriculture Urban Agriculture Key Laboratory Open Fund (UA201705)

*Corresponding author: Tel: 86-21-64321022; E-mail: xiaom88@shnu.edu.cn

Received: 28-08-2018; Accepted: 13-12-2018; Published online: 24-12-2018

基金项目:上海市 2016 年度“科技创新行动计划”项目(16391902100);农业部都市农业重点实验室开放基金(UA201705)

*通信作者: Tel: 021-64321022; E-mail: xiaom88@shnu.edu.cn

收稿日期: 2018-08-28; 接受日期: 2018-12-13; 网络首发日期: 2018-12-24

以及由于土壤渗透性、可用水容量和渗透率的下降而导致土壤团聚体减少^[3], 这都对粮食产量形成了较大威胁。现阶段主要采取的是物理、化学、生物这三类方法来进行盐碱地修复。物理方法主要采取冲洗、井灌井排和深翻等方法, 化学方法主要采取中和土壤中的碱性离子来达到除盐效果, 生物方法则采取种植特定的植物来排出耕地中的盐分, 例如澳大利亚学者 Yokota 在盐碱土壤中种植滨藜属 (*Atriplex*) 的耐盐植物来修复土壤^[4]。我国学者董积忠等也有相同的研究结果, 通过种植盐地碱蓬 (*Suaeda glauca* Bge)、盐角草 (*Salicornia* L.) 来达到除盐的效果^[5]。但以上方法耗费的成本较高且很难从根本上解决土壤盐渍化问题, 而解决这个问题就需从土质上入手, 冯磊等提出微生物肥料能从根本上改良土质^[6]。微生物肥料不仅能够改善土壤的质量, 还能够与植物联合修复盐碱土壤, 同时对番茄^[7]、鹰嘴豆^[8]、玉米^[9]等植物起到良好的促生作用, 提升其蛋白质含量、可溶性糖等, 并增加其矿物质和氮的吸收。因此, 对于微生物肥料作用于盐碱地的研究具有重要的意义。

1 微生物肥料概述

微生物肥料是一类含有活微生物的特定制品, 在农业生产中能够达到特定的效应, 制品中的活微生物在这种效应中起关键作用^[10-11]。目前, 微生物肥料主要分为三大类: 农用微生物菌剂、复合微生物肥料及生物有机肥^[11]。农用微生物菌剂主要是指有效菌种经过大规模生产之后, 与草炭等多孔物质相互结合制成的具有良好农业应用效果的活菌制剂^[12]; 复合微生物肥料主要是指两种或多种的有效菌种经过科学复配在农业生产中能够相对于单种活菌具有更好应用效果的一类菌肥^[13]; 生物有机肥则是有效菌种与腐熟的生物肥料如家禽家畜的粪便等相互结合或者伴随着生物原料一同发酵而形成的生物肥料。

1895年德国科学家 Noble 成功制备了第一款以根瘤菌为接种剂的微生物肥料, 之后各国纷纷开发

了多种微生物肥料^[14]。而我国微生物肥料起步相对较晚, 经历了3个阶段: 调查与引入; 初创; 生产与使用。在20世纪40年代陈华癸院士对黄芪共生氮固定进行了研究^[15]; 50年代开始从苏联引进菌剂, 被称为细菌肥料; 70-80年代科研部门开始研究土壤真菌; 80-90年代由于我国出台了肥料登记制度, 微生物肥料登记数迅速增加^[16-17]; 现阶段我国的微生物菌种保藏数目超过25 000株, 微生物肥料生产企业950家, 年产能超过1 000 t, 行业产值约为200亿元具有良好的发展势头。同时从中国农业部每年批准微生物肥料的数量可以看出现阶段微生物肥料正在蓬勃发展(图1)。

微生物肥料对植物的促生作用较早被人们所发现, 但在盐碱地修复上使用该项技术却相对较晚。现阶段国外的大部分探究主要集中在耐盐菌种的分离和盐碱极端环境下微生物的生理生化特征等^[18-20], 而我国则主要集中在微生物肥料在盐碱地的综合应用问题上^[21], 并在这方面取得了长足的进展。

2 微生物肥料对盐碱地的影响

2.1 微生物肥料提高盐碱土壤中酶活性与微生物量

随着土壤学研究的深入, 人们发现土壤微生物数量与土壤酶活性易受外界因素的影响引起变化, 高浓度的盐对土壤性质有负面影响, 同时对土壤酶

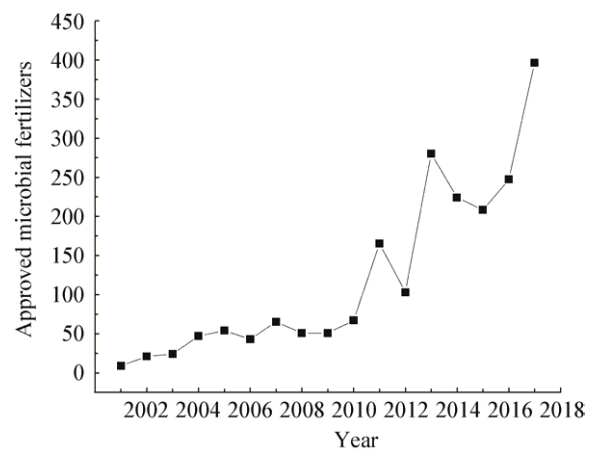


图1 近20年中国批准的微生物肥料数目

Figure 1 The number of microbial fertilizers approved by China in the past 20 years

活性也有不利的影响, 这将导致农业生产力的发展受到限制^[22-24]。Yuan 等在中国甘肃省的调查研究表明盐度会减少土壤中微生物群落多样性和降低土壤有机质分解的效果^[25]。而土壤酶很多时候被认为是土壤质量指标, 因为它们对外界诱导的土壤变化非常敏感, 并且其检测方法具有简单、方便、快捷、可重复性高的优点^[26]。Liu 等发现磷酸酶活性、脲酶活性、碱性磷酸酶活性和过氧化氢酶活性与土壤有机质(Soil organic matter, SOM)或土壤氮(N)均呈显著正相关, 与土壤盐度或 pH 呈负相关, 而过氧化氢酶活性与有效磷(P)呈极显著负相关^[27]。Liang 等认为脲酶与磷酸酶的活性较高与土壤肥力的提升呈现正相关, 因为脲酶可以有效地将土壤中的尿素转换成 NH_4^+ , 进而被植物所利用, 从而改善土壤肥力, 同时还可以通过增强 K^+ 选择性吸收和运输, 从而提升植物的耐盐性^[28]。而蔗糖酶可以将土壤中大分子糖分解成果糖和葡萄糖, 从而进一步被微生物和植物利用。陈娟丽等认为蔗糖酶促进碳元素在土壤中进行循环^[29]。纤维素酶将土壤中纤维素分解为单糖, 使植物更容易利用; 过氧化氢酶则将过氧化氢分解为水和氧, 从而有效地减缓植物由于盐胁迫产生的过氧化物的危害。土壤微生物量对土壤肥力来说也是至关重要的, 它能够积极地参与物质养分循环, 同时也是土壤能量和养分的源和库, 它的数量能够显著地呈现调控土壤物质、能量循环、有机物转化的活跃程度^[30-31], 而微生物肥料在盐碱地中能有效提升这两类物质的量。

在宋玉珍的研究中发现, 微生物肥料能够有效地增加苗木存活率, 还能够显著增加微生物量, 与空白对照相比微生物量提升了 3.5 倍^[32]。孙佳杰也有相似的研究结果, 发现施用微生物肥料的土壤中细菌、放线菌、真菌分别是对照组的 2.7、2.9 与 5.7 倍^[33]。而且张胜男的研究表明, 在对红薯施加微生物肥料后, 其土壤中脲酶活性相对于空白对照组与施用化学肥料的对照组相比分别提高了 68.6% 与 123.5%^[34]。不只是脲酶的活性会随着施加微生物肥料而提升, 在孙书秒等的研究中还发现, 在施

用了一株中度嗜盐菌后棉花现蕾期土壤蔗糖酶活性也会显著提升, 与空白对照的 $4.52 \text{ mg}/(\text{kg}\cdot\text{h})$ 相比提升至 $13.93 \text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$, 增长超过 300%^[35]。Gao 等研究表明在施用伯克霍尔德菌(*Burkholderia cepacia*) 后种植番茄的土壤中脲酶、磷脂酶、蔗糖酶和过氧化氢酶都分别显著提高了 17%、7%、30% 和 19%^[36]。Xun 等在被石油所污染的盐碱土地上种植燕麦也得到了同样的结果, 使用 AM 真菌进行接种生长 60 d 后发现, 随着 AM 真菌的接种量由 $0 \text{ g}/\text{kg}$ 提升至 $10 \text{ g}/\text{kg}$, 燕麦的株高、茎鲜重和根鲜重均有显著的提升。土壤中接种 $10 \text{ g}/\text{kg}$ 的 AM 真菌后, 土壤中脲酶、蔗糖酶和脱氢酶都有显著的上升, 分别提升约 28%、13%、20%^[37]。

简而言之, 微生物肥料能够有效地提升土壤中微生物量和酶的活性, 从而达到促进养分循环和将土壤中难以被利用的物质转换成植物可以利用的物质, 在根本上提升土壤肥力, 达到改良盐碱地的效果。

2.2 微生物肥料对盐碱土壤中理化参数的影响

盐碱地中的植物之所以难以生长, 其中一个重要因素便是盐碱土壤 pH 过高、盐分聚集严重、团聚体比例不合适从而导致其物理性状差, 出现土壤易板结、通气透水能力较低、毛细管通透性差、机质消耗过快无法存储肥力的现象, 土壤中大量复杂的营养物难以被利用。微生物肥料可以将难溶解的磷转化为可被植物利用的磷, 以及通过胞外蛋白酶、胞外脂肪酶等活性物质分解土壤中一些植物无法吸收利用的大分子物质, 进而转换成植物能够吸收利用的氮源和碳源^[38]。而 Carter 认为伴随着土壤聚集体的尺寸和稳定性的增加将使土壤和有机物质相对富集, 这能有效地增加微生物活性, 具体体现为土壤微生物生物量的增加, 可直接影响土壤质量功能如植物生长、能量调节和土壤结构稳定性^[39]。

微生物肥料与植物的联合作用就可以改善以上提到的土壤物理化学参数。Mehdi 等的研究发现在盐碱地中不同浓度的氮肥与生物肥料固氮螺菌属(*Azospirillum*) 一同使用可以更有效地增加土壤的总氮含量、可用磷含量、可交换 K^+ 含量, 最为关键的

是, 该生物肥料与氮肥共同施用能够更有效地降低土壤 pH 值, 连续三年施用 150% 推荐剂量的氮肥能够将土壤中的 pH 由 9.1 下降至 8.35, 而与生物肥料共同施用的 pH 值则下降至 8.30, 降幅更大^[40]。Mbarki 等也具有类似的发现, 他们使用哈茨木霉菌 T78 混合肥来改良葡萄园的盐碱土壤, 发现随着时间的推移, 哈茨木霉菌 T78 的改良效果逐渐上升, 该菌株能够有效地增加土壤的全有机碳(Total organic carbon, TOC)和 NH_4^+ 的含量, 帮助植物更为有效地提升营养摄取能力^[41]。Zhang 等则另辟蹊径地进行了土壤物理性质的研究, 发现微团聚体(Microaggregate)与盐浓度呈现显著正相关, 而大团聚体(Macroaggregate)则呈现显著的负相关, Zhang 等将 AM 真菌与蚯蚓联合使用发现能有效地降低微团聚体(Microaggregate)比例, 降幅达到 60.6%, 同时可有效地增加大团聚体(Macroaggregate)的比例, 增幅可达 58.9%^[2]。Sandhya 等的研究也发现了恶臭假单胞菌(*Pseudomonas putida*) GAP-P45 在 1.4 mol/L 盐浓度胁迫下相对于未受到盐胁迫的细菌产生了超过 2 倍的胞外多糖(Extracellular polymeric substances, EPS), 而这些胞外多糖(EPS)能够有效地联结土壤, 增加大团聚体(Macroaggregate)的比例, 从而改善盐碱土壤物理性质^[42]。Qurashi 等的研究则发现了在盐碱条件下可变盐单胞菌(*Halomonas variabilis*) HT1 和莱比托游动球菌(*Planococcus rifietoensis*) RT4 与鹰嘴豆联合使用之后能够更为明显地在宿主植物的根部得到更多的土壤团聚体, 与空白对照相比提升了 8 倍与 6 倍, 效果极显著^[43]。

换言之, 微生物肥料在盐碱土壤中可以通过改善 pH、团聚体比例、速效磷、速效钾、有机质等物理化学参数增加土壤的肥沃程度, 从而有效地改善盐碱地土壤营养贫乏的现状。

2.3 微生物肥料促进保护盐碱地植物的生长

植物根际促生细菌(Plant growth promoting rhizobacteria, PGPR)是构成微生物肥料的主要成分。微生物肥料能够与植物形成复杂的网络, 直接或者间接地影响植物生长, 而植物通过释放根际分

泌物来吸引更多的微生物定殖^[44]。在盐碱环境下微生物肥料能触发植物的诱导体系抗性(Induced systemic tolerance, IST), 从而使植物能够更好地对抗不良环境和通过分泌物来抵抗植物病原细菌的侵害^[45]。

微生物肥料在盐碱地中主要通过 3 种方式来调节植物对盐碱地的耐受性。(1) 微生物肥料通过调节植物激素(乙烯、吲哚-3-乙酸、脱落酸等)来降低盐碱地对植物的毒害作用, 已知植物受到盐胁迫会产生过量的乙烯, 而乙烯会严重阻碍根系发育, 微生物肥料则通过释放 ACC 脱氢酶来降解乙烯的前体 ACC 生成氨和 α -酮丁酸, 从而达到保护植物根系生长的目的(图 2: 以乙烯为例)^[46]。(2) 微生物肥料通过显著改善植物中的 Na^+ 排出和 K^+ 摄取, 从而增加 K^+/Na^+ 比例, 改善植物的营养吸收^[47]。芽孢杆菌(*Bacillus*)在高盐条件下增加了番茄的盐耐受性, 同时也提高了水分利用效率^[48]。Kadmiri 等在水稻上的实验也证明了这一点, 在高盐条件下施加了假单胞菌(*P. fluorescens*) Ms-01 的水稻株高增加了 15%, 茎重和根重分别增加了 42% 和 133%, 效果显著^[49]。微生物肥料还通过分泌胞外多糖(EPS)以一定方式聚集在植物根表面形成细菌生物膜, 从而限制 Na^+ 流入根^[50]。Chanratana 等的研究表明生物膜的形成在 0.1 mol/L NaCl 条件下具有良好的成膜能力, 同时在 0.2 mol/L NaCl 条件下与 0.1 mol/L NaCl 条件下相比峰值不发生改变, 所以推测生物膜在盐碱地条件下依然能有良好的成膜效果^[51]。通过生成生物膜调节 Na^+ 摄入只是其中的一种方法, 微生物肥料还可以通过调节水通道蛋白活性增加植物自身的耐盐度, 在 0.1 mol/L NaCl 的胁迫之下拟南芥的导水率仅为正常水平的 30%, 说明通道蛋白活性降低, 该行为能够使叶片气孔关闭从而使更少的水被蒸发, 有利于保持水分抵抗盐耐受性, 同时也能减少部分 Na^+ 的摄入从而减轻毒害^[52]。(3) 微生物肥料释放挥发性有机化合物(Volatile organic compounds, VOCs), 引发植物的一系列生理变化提高植物盐碱耐受性^[53]。Bhattacharyya 等通过收集粪产碱杆菌(*Alcaligenes faecalis*) JBCS1294 的 VOC 进行实验, 发现有单种

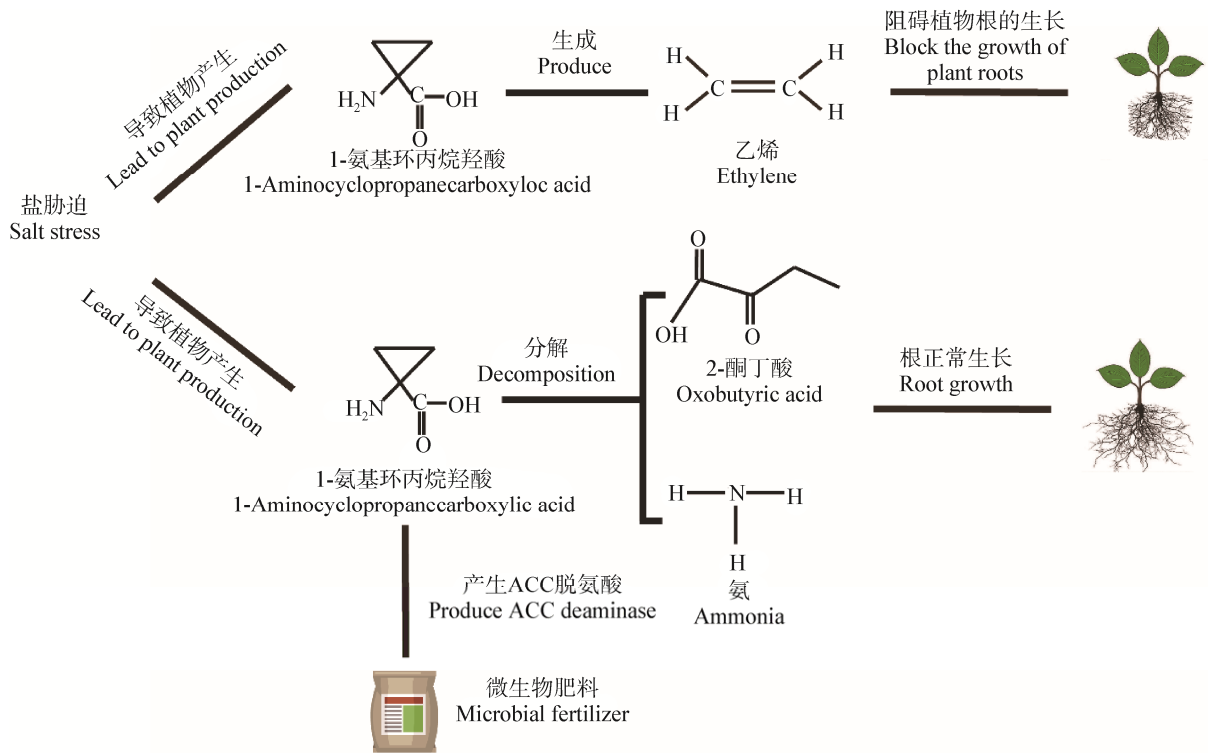


图 2 微生物肥料帮助植物抵抗盐胁迫的机制(以乙烯为例)

Figure 2 The mechanism of microbial fertilizers that help plants resist salt stress (for example, ethylene)

VOC 能在不同的盐浓度下发挥作用^[54]。Jalali 等发现不同的木霉菌能够提升拟南芥的耐盐性, 而且这样的提升还具有选择性, 即: 如果植物未受到盐胁迫则 VOC 并不会提升拟南芥的盐耐受性, 只有当植物受到盐胁迫且同时具有相应的挥发物时才能启动植物诱导体系抗性(IST)^[55]。

简而言之, 微生物肥料不只是能够通过改良土壤来修复盐碱地, 还能够通过直接引发植物的诱导体系抗性(IST), 改变 K^+/Na^+ 等方式来改善植物在盐碱地的生存状况和产量, 从而间接地达到改善盐碱地的目的。

2.4 微生物肥料对盐碱土壤微生物群落的影响

据推测全球土壤中的微生物数量非常庞大, 可高达 10^{29} 的数量级, 种类也达数万种, 但土壤中的微生物可培养率却不足 1%^[56-57], 所以利用二代测序技术来研究微生物肥料对于盐碱地微生物群落的影响成为研究热点。牛世全等的研究表明在原生盐碱土、次生盐碱土、农田土中, 原生盐碱土的微

生物多样性最低, 而农田土微生物多样性最高; 同时, 在群落构成中原生盐碱土与次生盐碱土、农田土有较大的差异, 次生盐碱土与农田土并没有较大差异; 但三者相对丰度上有着巨大的差异, 变形菌门为原生盐碱土和农田土中的优势菌门, 放线菌门是次生盐碱土中的优势菌门^[58]。

微生物肥料能够有效改善盐碱土壤中的微生物群落结构。付健的研究表明在种植玉米的盐碱地施加木霉菌(*Trichoderma*)后, 在门分类水平的构成上与对照相比并没有显著差异, 但酸杆菌门(*Acidobacteria*)、变形菌门(*Proteobacteria*)和芽单胞菌门(*Gemmatimonadetes*) 在丰度上出现了差异, 其中在施加了木霉菌(*Trichoderma*)后 α -变形菌(*Alpha Proteobacteria*) 丰度有了显著的提升, α -变形菌(*Alpha Proteobacteria*) 在土壤中主要起到帮助植物抵抗土壤中病原真菌的作用, 并提升植物的抗氧化能力; 硝化螺旋菌门(*Nitrospirae*)能够有效降低土壤中盐碱度, 在施加了木霉菌的盐碱土壤中该菌种的

丰度也显著增加了,从而改良盐碱土壤;酸杆菌门(*Acidobacteria*)的丰度与 pH 呈现负相关的趋势,而随着木霉菌(*Trichoderma*)的加入,酸杆菌(*Acidobacteria*)的丰度也呈现上升的趋势,也就意味着木霉菌(*Trichoderma*)能够有效降低土壤的 pH 值而达到改良盐碱地的效果,影响酸杆菌(*Acidobacteria*)的丰度^[59]。Zhang 等也有相关的研究发现 AM 真菌菌丝将富含碳的化合物释放到土壤中,可刺激溶磷细菌增殖(Phosphonate bacteria, PSB),增强磷矿化,从而增加土壤中的可利用磷,对植物起到促生作用^[2]。

3 微生物肥料固定化后作用于盐碱地的影响

现阶段微生物难以被大规模应用于盐碱地修复的主要问题在于直接施用活体菌液存在运输困难、活性损失且易受环境的影响,从而导致无法发挥原有的效果。而使用菌种的次级代谢产物则由于菌种或发酵技术的限制,产量较低导致成本高昂、实用性降低。因此大家开始普遍使用细胞固定技术来固定微生物。细胞固定技术主要是能使微生物在较为稳定的环境中形成优势菌种,从而能够更好地与土著菌种进行竞争达到更好的改良效果^[60]。现阶段常用的微生物肥料固定技术主要有两种:包埋法与吸附法。

3.1 包埋法

包埋法是将微生物或者酶包裹在多孔载体内进行固定的一种方法,常用的多孔载体主要为海藻酸钠、明胶、卡拉胶、聚乙烯醇、聚丙烯酰胺等高分子材料^[61]。在实验室条件下 Kumar 等的研究表明使用海藻酸钠能够有效地留存芽胞杆菌的细菌数量,留存效果长达 90 d,直至 120 d 衰减至 1/5^[62]。Onwosi 等的研究也表明使用聚乙烯醇固定化的硝基还原假单胞菌(*Pseudomonas nitroreducens*)并不会降低其产鼠李糖酶的能力^[63]。Prabhune 等的研究表明将细胞固定在聚丙烯酰胺中能够有效地增加其重复使用次数,甚至达到 90 次^[64]。韩梅等使用复合材料海藻酸钠-聚乙烯醇进行研究发现,

经过 72 h 后颗粒的活菌增长 500 倍,活菌数达到 10^{11} CFU/g^[65]。由此看出包埋法能够有效地解决菌种易失活、菌种保藏运输的问题,还能有效地增殖和增强活性。在实际运用中也确实如此,曹勇等通过将质量分数为 5.5% 海藻酸钠加热至 75 °C,待其冷却过筛后加入嗜麦芽寡养单胞菌(*Stenotrophomonas maltophilia*),再与多种物质复合,从而得到适用于盐碱条件下的微生物复合肥料,该肥料能够有效中和土壤的盐碱环境,能释放出氮、磷、钾等物质来对植物起到促生作用,同时还能改良农产品质量^[66]。Wu 等也有相似的研究,他们将克雷伯氏菌(*Klebsiella oxytoca*) Rs-5 通过海藻酸钙进行包埋得到微生物肥料后发现显著地提升了其在盐水中的生存能力,3 个月后其释放的细菌数量依旧达到了 10^7 CFU/mL,又将该菌株制备的微生物肥料应用于盐碱土壤中生长的棉花,发现与游离的细菌相比,其显著地提升了棉花发芽率(3%)和鲜重(13.2%),具有更好的促生效果^[67]。所以包埋法能够有效保存菌株的活力和性质,而且在实际应用中也能够有效增加作物产量。

3.2 吸附法

吸附法是直接将微生物固定于载体上的一种方式,该方法简单、易行、适合大规模的生产,但缺点也同样明显,主要存在微生物与载体结合不够牢固,易脱落从而限制其使用^[60]。在该方面本实验室王婧等发现桔黄假单胞菌 JD37 菌株(*Pseudomonas aurantiaca* JD37)能够有效地被滑石粉和硅藻土所吸附,前者的吸附能力高于后者 10 倍,且释放菌的数量也高出 2.74 倍^[68]。而桔黄假单胞菌 JD37 在之后的研究工作中被证实能够有效地提升土壤中细菌和放线菌的生物量,分别达到 2.08 倍和 1.22 倍^[69]。辛树权等的研究表明在高盐条件下草炭能有效地增加土壤有机质的含量,且在 10% 草炭与促生菌 CS2、CC9 共同使用的情况下能更有利于水稻苗的生长^[70]。赵林等通过将有益微生物进行木薯渣、牛羊粪吸附从而得到专用于盐碱土壤的微生物肥料,再将其施用在轻度盐碱地、中度盐碱地、重度盐碱

地均有效增加了玉米、棉花、高粱的出苗率、平均株高和亩产的种子重^[71]。严慧峻等通过草炭吸附枯草芽胞杆菌和地衣芽胞杆菌制成微生物肥料施加在盐碱地上增加了向日葵出苗率、保苗率以及亩产量,同时土壤中的有机质含量增加 47%,盐分下降了 50%,产量增加了 15%^[72]。而现阶段生物炭成为盐碱土壤较好的改良选择,Hammer 等在盐碱条件下将 AM 真菌与生物炭混合作用,研究其对莴笋的促生作用发现能够有效减少植物茎的 Na^+ 摄入,提升植物株高,而且能有效地降低土壤 EC 值到 19.3%,是一个具有良好应用潜力的新型吸附剂^[73]。可见在实际的盐碱地修复中吸附法也具有较大的应用潜力。

综上不难看出包埋法用于制作微生物肥料效果更为有效,但是却存在着工艺程序复杂、成本相对较高、部分包埋材料可能有毒有害等问题;吸附法虽然简单、成本低廉、易于工业化,但实际的效果却较为逊色。所以如何选择合适的包埋剂成为了一大难题。当然,微生物肥料的吸附方式不仅仅只有上述两种,还有结合法和交联法等,但因成本较高而不适用于商业生产。

4 总结与展望

4.1 总结

总而言之,微生物肥料不仅能够帮助植物抗病、抗虫,更能帮助植物抵抗非生物胁迫效应(盐胁迫、水胁迫、重金属胁迫等),还可有效地增加土壤肥力,提升土壤中酶活性以及土壤中的微生物量,而且能够改善土壤有机质、速效磷、速效钾,缓解高 pH、EC 值等土壤理化参数,同时还能刺激植物产生诱导体系抗性(IST),以及通过对植物基因的调控和形成生物膜等方式调控摄入的 Na^+/K^+ ,达到保护植物的目的,而且微生物肥料并不会对土壤产生难以挽回的损伤,是一类环境友好型肥料,随着农业部提出 2020 年的化肥施用目标,微生物肥料将在未来肥料的使用中占据越来越重要的地位,所以在盐碱地的修复中推广微生物肥料具有重要的意义(图 3)。

4.2 展望

在微生物肥料中存在的问题不容忽视,现阶段大多数的微生物肥料多采用吸附法,这很容易造成在长途运输中微生物失活,从而造成肥效与修复效果不稳定,这是一个亟待解决的问题。同时由于并没有进行相应的细分,从而导致专用于盐碱地的微生物肥料缺乏一定的行业标准,建议应针对不同类型的土壤出台相应的标准才能使微生物肥料得到更好的应用。现阶段而言,微生物肥料相较于化学肥料可能价格并不占优势,还需要国家政策的推动、扶持,共同推动我国盐碱地相关方面的治理。最后由于现阶段生物肥料多是由一种或两种微生物组成,与自然界中微生物种类的多样性差异巨大,所以导致在盐碱地上的施用出现了许多问题,例如见效慢、在环境中的抗逆性较差,最终效果不尽如人意。因此现在提出了合成微生物群落(Synthetic microbial communities, SMCs),旨在增加除了传统的微生物-植物的相互作用,希望增加微生物与微生物的相互作用,从而增强微生物肥料与盐碱地上的作用效果。预期的 SMCs 至少包括一系列负责营养物溶解、根部定殖、生成 ACC 脱氨酶、胞外多糖和抗生素的成员,通过不同菌种之间的分工合作,更好地赋予植物的耐盐性和改善盐碱地^[74-77]。由于微生物肥料非常易受许多环境因素如 pH、盐度、栽培方法等的影响,所以有必要针对不同的地区、环境开发不同的微生物肥料,换言之需要找出微生物肥料性能在何种条件下才能发挥出其最大的效果^[78],所以构建既能够有效适应盐碱环境,又能提升植物耐盐性和改良土壤理化性质的合成微生物群落复合微生物肥料将成为解决土壤盐渍化的重要研究方向。

当然,现阶段也不只有微生物之间的相互作用来改善盐碱地,还有微生物与各种生物联合作用以改善盐碱地,比如蚯蚓与 AM 真菌的联用能有效地缓解盐对植物的胁迫^[2], TiO_2 与根际细菌的联合使用可以有效地增强根际细菌促生能力^[79],使用外源激动素与根际细菌联用也能有效地增加黑豆在盐

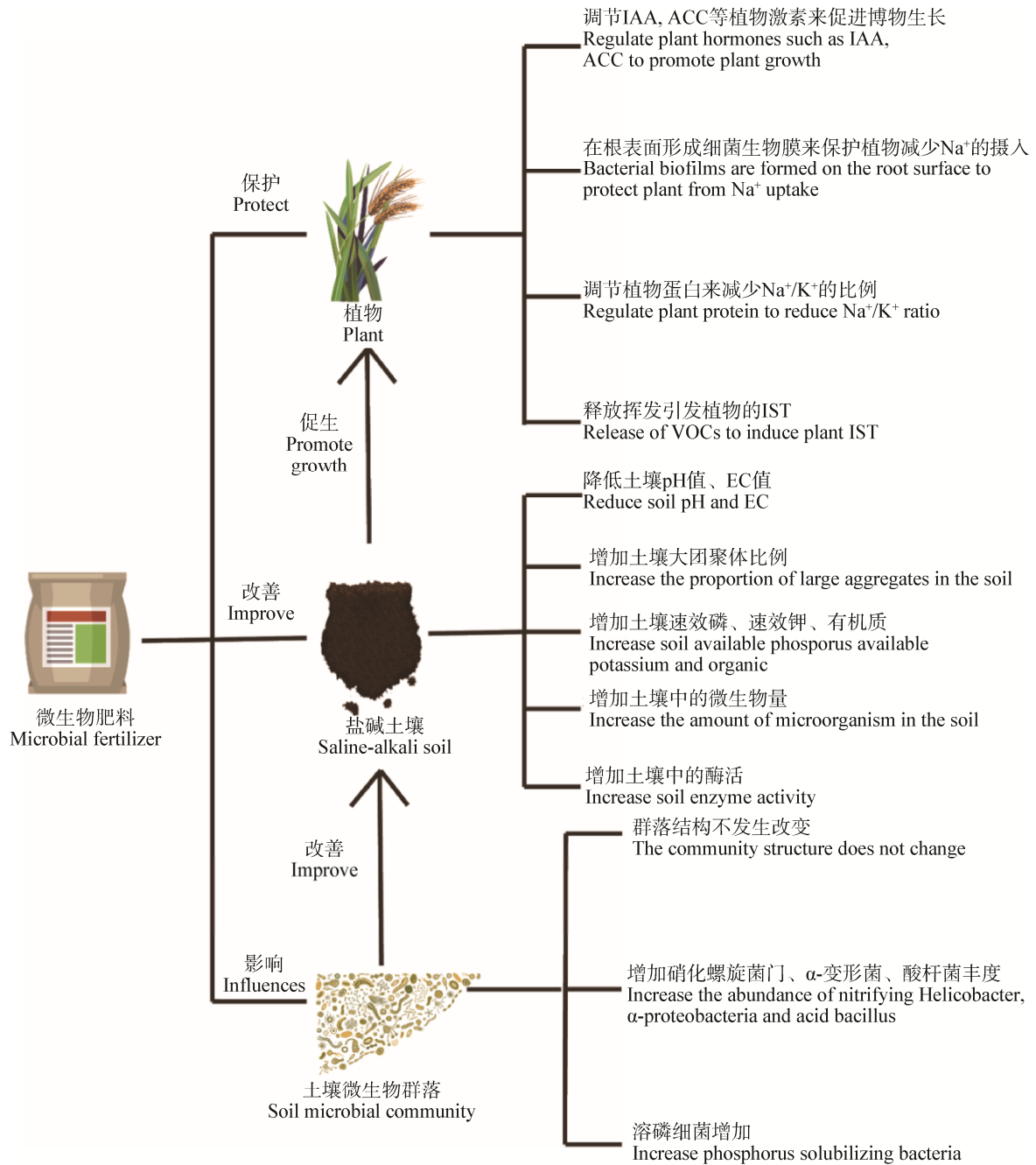


图3 盐碱条件下加入微生物肥料后土壤微生物-植物-盐碱土壤的互作关系以及影响

Figure 3 The interactions and effects of soil microbial-plant-saline soils after adding microbial fertilizers under saline-alkali condition

碱地的耐受性^[80],由此可见微生物肥料与越来越多的化学、生物物质之间的联用将成为微生物修复盐碱地的新方向。但这样的联用缺乏在土壤群落方面的相关性研究,而这样的研究正在成为热点,可以

考虑拓展更多该方面的研究,以探究微生物肥料与不同的生物物质之间互作之后对土壤微生物群落的影响,从而为微生物肥料的后续应用打下坚实的理论基础。

REFERENCES

- [1] Godfray H CJ, Beddington JR, Crute IR, et al. Food security: the challenge of feeding 9 billion people[J]. *Science*, 2010, 327(5967): 812-818
- [2] Zhang WW, Wang C, Lu TY, et al. Cooperation between arbuscular mycorrhizal fungi and earthworms promotes the physiological adaptation of maize under a high salt stress[J]. *Plant and Soil*, 2018, 423(1/2): 125-140
- [3] Oo AN, Iwai CB, Saenjan P. Soil properties and maize growth in saline and non-saline soils using cassava-industrial waste compost and vermicompost with or without earthworms[J]. *Land Degradation & Development*, 2015, 26(3): 300-310
- [4] Yokota S. Relationship between salt tolerance and proline accumulation in Australian acacia species[J]. *Journal of Forest Research*, 2003, 8(2): 89-93
- [5] Dong JZ, Yin CH, Wang HX, et al. Comparison of two species of halophyte in removing and reducing soil salinity from saline soil[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2014, 51(1): 124-128 (in Chinese)
董积忠, 尹传华, 王海孝, 等. 两种盐生植物移盐能力及土壤改良效果比较[J]. *新疆农业科学*, 2014, 51(1): 124-128
- [6] Feng L, Sun Y, Liu ZL, et al. Experiments on mechanization of microbial manure application in improvement of saline-alkali land[J]. *South Agricultural Machinery*, 2017, 48(21): 18,21 (in Chinese)
冯磊, 孙岩, 刘志良, 等. 微生物菌肥机械化撒施技术在盐碱地改良中的试验[J]. *南方农机*, 2017, 48(21): 18,21
- [7] Fan XH, Zhang SA, Mo XD, et al. Effects of plant growth-promoting rhizobacteria and N source on plant growth and N and P uptake by tomato grown on calcareous soils[J]. *Pedosphere*, 2017, 27(6): 1027-1036
- [8] Oliveira RS, Carvalho P, Marques G, et al. Increased protein content of chickpea (*Cicer arietinum* L.) inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi and nitrogen-fixing bacteria under water deficit conditions[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017, 97(13): 4379-4385
- [9] Sheng M, Tang M, Chen H, et al. Influence of arbuscular mycorrhizae on photosynthesis and water status of maize plants under salt stress[J]. *Mycorrhiza*, 2008, 18(6/7): 287-296
- [10] Li CM. Literature review of microbial fertilizer research[J]. *Agriculture of Henan*, 2018(1): 26-27 (in Chinese)
李常猛. 微生物肥料研究文献综述[J]. *河南农业*, 2018(1): 26-27
- [11] Liu J, Li J, Ge C. Advance in role mechanism of microbial fertilizer[J]. *Journal of Microbiology*, 2001, 21(1): 33-36 (in Chinese)
刘健, 李俊, 葛诚. 微生物肥料作用机理的研究新进展[J]. *微生物学杂志*, 2001, 21(1): 33-36
- [12] Ming L. Preliminary report of the test result of rice yield increasing by farm-oriented microbial inoculant[J]. *Agricultural Science & Technology and Equipment*, 2016(3): 7-9 (in Chinese)
明亮. 农用微生物菌剂对水稻增产效果试验初报[J]. *农业科技与装备*, 2016(3): 7-9
- [13] Zhang JM, Xia SY, Fan GP, et al. Application of compound microbial fertilizer on peach tree[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016, 44(10): 124-126 (in Chinese)
张建明, 夏森玉, 范广璞, 等. 复合微生物肥料在桃树上的应用效果[J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(10): 124-126
- [14] Zhao BQ, Zhang FS, Liao ZW, et al. Research on development strategies of fertilizer in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2004, 10(5): 536-545 (in Chinese)
赵秉强, 张福锁, 廖宗文, 等. 我国新型肥料发展战略研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(5): 536-545
- [15] Chen DD, Zhang H, Liu H. Pursue the truth, devote to education: Chen Hua-Kui, a respectable educator and pioneer of China's soil microbiology[J]. *Protein & Cell*, 2016, 7(6): 389-390
- [16] Ma CB, Shi MY. Development status of microbial fertilizer industry in China[J]. *China Agricultural Technology Extension*, 2016, 32(2): 13-18 (in Chinese)
马常宝, 史梦雅. 我国微生物肥料产业发展状况[J]. *中国农技推广*, 2016, 32(2): 13-18
- [17] Chen TW, Ge C. Trend of microbial fertilizer development in China[J]. *Soils and Fertilizers*, 1995(6): 16-20 (in Chinese)
陈廷伟, 葛诚. 我国微生物肥料发展趋向[J]. *土壤肥料*, 1995(6): 16-20
- [18] Nagai K, Suzuki K, Okada G. Studies on the distribution of alkalophilic and alkali-tolerant soil fungi II: fungal flora in two limestone caves in Japan[J]. *Mycoscience*, 1998, 39(3): 293-298
- [19] Matsuda Y, Sugiyama F, Nakanishi K, et al. Effects of sodium chloride on growth of ectomycorrhizal fungal isolates in culture[J]. *Mycoscience*, 2006, 47(4): 212-217
- [20] Vargas VA, Delgado OD, Hatti-Kaul R, et al. Lipase-producing microorganisms from a Kenyan alkaline soda lake[J]. *Biotechnology Letters*, 2004, 26(2): 81-86
- [21] Zhou NY. Microbial diversity in saline-alkali soil[J]. *Microbiology China*, 2012, 39(7): 1030 (in Chinese)
周宁一. 盐碱地微生物类群的多样性[J]. *微生物学通报*, 2012, 39(7): 1030
- [22] Rady MM. Effect of 24-epibrassinolide on growth, yield, antioxidant system and cadmium content of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants under salinity and cadmium stress[J]. *Scientia Horticulturae*, 2011, 129(2): 232-237
- [23] Karlen DL, Tomer MD, Neppel J, et al. A preliminary watershed scale soil quality assessment in north central Iowa, USA[J]. *Soil and Tillage Research*, 2008, 99(2): 291-299
- [24] Rietz DN, Haynes RJ. Effects of irrigation-induced salinity and sodicity on soil microbial activity[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(6): 845-854
- [25] Yuan BC, Li ZZ, Liu H, et al. Microbial biomass and activity in salt affected soils under arid conditions[J]. *Applied Soil Ecology*, 2007, 35(2): 319-328
- [26] Rao MA, Scelza R, Acevedo F, et al. Enzymes as useful tools for environmental purposes[J]. *Chemosphere*, 2014, 107: 145-162
- [27] Liu GM, Zhang XC, Wang XP, et al. Soil enzymes as indicators of saline soil fertility under various soil amendments[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 237: 274-279
- [28] Liang YC, Yang YF, Yang CG, et al. Soil enzymatic activity and growth of rice and barley as influenced by organic manure in an anthropogenic soil[J]. *Geoderma*, 2003, 115(1/2): 149-160
- [29] Chen JL, Shi SL, Qi J. Effect of combined application of phosphate and microbial fertilizer on soil microbial quantity and soil enzyme activity in alpine region[J]. *Grassland and Turf*, 2016, 36(1): 7-13 (in Chinese)
陈娟丽, 师尚礼, 祁娟. 复合菌肥与化肥配施对高寒地区土壤微生物数量和土壤酶活性的影响[J]. *草原与草坪*, 2016, 36(1): 7-13
- [30] Taylor JP, Wilson B, Mills MS, et al. Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and subsoils using various techniques[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(3): 387-401
- [31] Arunachalam K, Arunachalam A, Melkania NP. Influence of soil properties on microbial populations, activity and biomass in humid subtropical mountainous ecosystems of India[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 30(3): 217-223
- [32] Song YZ. Study on application of microbiological fertilizer afforestation on Songnen plain saline alkali land[D]. Harbin: Doctoral Dissertation of Northeast Forestry University, 2009 (in Chinese)
宋玉珍. 微生物肥料在松嫩平原盐碱地造林中的应用研究[D].

- 哈尔滨: 东北林业大学博士学位论文, 2009
- [33] Sun JJ. Distribution of microorganism and modified effects of microfertilizer on saline soil in Castal area[D]. Tianjin: Master's Thesis of Tianjin University of Technology, 2010 (in Chinese)
孙佳杰. 滨海盐渍土微生物分布及菌肥改良效果研究[D]. 天津: 天津理工大学硕士学位论文, 2010
- [34] Zhang SN. Development of granule microbial fertilizer and its effect and mechanism of plant growth-promoting[D]. Hohhot: Doctoral Dissertation of Inner Mongolia Agricultural University, 2017 (in Chinese)
张胜男. 颗粒微生物肥料的研制及其促生机理研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学博士学位论文, 2017
- [35] Sun SM. The effect of moderately halophilic bacteria on soil physical and chemical properties of cotton, enzyme activity and microbial diversity[D]. Shihezi: Master's Thesis of Shihezi University, 2011 (in Chinese)
孙书秒. 中度嗜盐菌对棉田土壤理化性质、土壤酶及微生物多样性的影响[D]. 石河子: 石河子大学硕士学位论文, 2011
- [36] Gao M, Zhou JJ, Wang ET, et al. Multiphasic characterization of a plant growth promoting bacterial strain, *Burkholderia* sp. 7016 and its effect on tomato growth in the field[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(9): 1855-1863
- [37] Xun FF, Xie BM, Liu SS, et al. Effect of plant growth-promoting bacteria (PGPR) and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) inoculation on oats in saline-alkali soil contaminated by petroleum to enhance phytoremediation[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(1): 598-608
- [38] Egamberdieva D, Wirth SJ, Shurigin VV, et al. Endophytic bacteria improve plant growth, symbiotic performance of chickpea (*Cicer arietinum* L.) and induce suppression of root rot caused by *Fusarium solani* under salt stress[J]. Frontiers in Microbiology, 2017, 8: 1887
- [39] Carter MR. Researching structural complexity in agricultural soils[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 79(1): 1-6
- [40] Mehdi SM, Sarfraz M, Shabbir G, et al. Effect of inorganic nitrogenous fertilizer on productivity of recently reclaimed saline sodic soils with and without biofertilizer[J]. Pakistan Journal of Biological Sciences, 2007, 10(14): 2396-2401
- [41] Mbarki S, Cerdà A, Brestic M, et al. Vineyard compost supplemented with *Trichoderma harzianum* T78 improve saline soil quality[J]. Land Degradation & Development, 2017, 28(3): 1028-1037
- [42] Sandhya V, Ali SZ. The production of exopolysaccharide by *Pseudomonas putida* GAP-P45 under various abiotic stress conditions and its role in soil aggregation[J]. Microbiology, 2015, 84(4): 512-519
- [43] Qurashi AW, Sabri AN. Bacterial exopolysaccharide and biofilm formation stimulate chickpea growth and soil aggregation under salt stress[J]. Brazilian Journal of Microbiology, 2012, 43(3): 1183-1191
- [44] Kang YJ, Shen M, Wang HL, et al. Diversity, microbial ecology and isolated methods of plant growth - promoting rhizobacteria (PGPR)[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2012, 51(24): 5553-5558 (in Chinese)
康贻军, 沈敏, 王欢莉, 等. 根际微生物群落与促生菌多样性及其筛选策略[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(24): 5553-5558
- [45] Etesami H, Maheshwari DK. Use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) with multiple plant growth promoting traits in stress agriculture: action mechanisms and future prospects[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 156: 225-246
- [46] Qin Y. Plant-associated microbiota from saline areas and its potential phyto-beneficial effects[D]. Beijing: Master's Thesis of Chinese Academy of Forestry, 2017 (in Chinese)
秦媛. 盐碱地植物共生微生物资源及功能初步研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院硕士学位论文, 2017
- [47] Qin Y, Druzhinina IS, Pan XY, et al. Microbially mediated plant salt tolerance and microbiome-based solutions for saline agriculture[J]. Biotechnology Advances, 2016, 34(7): 1245-1259
- [48] Porcel R, Zamarreño ÁM, García-Mina JM, et al. Involvement of plant endogenous ABA in *Bacillus megaterium* PGPR activity in tomato plants[J]. BMC Plant Biology, 2014, 14: 36
- [49] Kadmiri IM, Chaouqui L, Azaroual SE, et al. Phosphate-solubilizing and auxin-producing rhizobacteria promote plant growth under saline conditions[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2018, 43(7): 3403-3415
- [50] Dodd IC, Pérez-Alfocea F. Microbial amelioration of crop salinity stress[J]. Journal of Experimental Botany, 2012, 63(9): 3415-3428
- [51] Chanratana M, Han GH, Choudhury AR, et al. Assessment of *Methylobacterium oryzae* CBMB20 aggregates for salt tolerance and plant growth promoting characteristics for bio-inoculant development[J]. AMB Express, 2017, 7: 208
- [52] Sun LL, Xin SC, Qiang XJ, et al. Responsive regulation of aquaporins in the plants exposed to abiotic stresses[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(4): 1040-1048 (in Chinese)
孙琳琳, 辛士超, 强晓晶, 等. 非生物胁迫下植物水通道蛋白的应答与调控[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 1040-1048
- [53] Liu XM, Zhang HM. The effects of bacterial volatile emissions on plant abiotic stress tolerance[J]. Frontiers in Plant Science, 2015, 6: 774
- [54] Bhattacharyya D, Lee YH. A cocktail of volatile compounds emitted from *Alcaligenes faecalis* JBCS1294 induces salt tolerance in *Arabidopsis thaliana* by modulating hormonal pathways and ion transporters[J]. Journal of Plant Physiology, 2017, 214: 64-73
- [55] Jalali F, Zafari D, Salari H. Volatile organic compounds of some *Trichoderma* spp. increase growth and induce salt tolerance in *Arabidopsis thaliana*[J]. Fungal Ecology, 2017, 29: 67-75
- [56] Torsvik V, Goksøyr J, Daae FL. High diversity in DNA of soil bacteria[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1990, 56(3): 782-787
- [57] Whitman WB, Coleman DC, Wiebe WJ. Prokaryotes: the unseen majority[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1998, 95(12): 6578-6583
- [58] Niu SQ, Long Y, Li HY, et al. Microbial diversity in saline alkali soil from Hexi Corridor analyzed by Illumina MiSeq high-throughput sequencing system[J]. Microbiology China, 2017, 44(9): 2067-2078 (in Chinese)
牛世全, 龙洋, 李海云, 等. 应用 Illumina MiSeq 高通量测序技术分析河西走廊地区盐碱土壤微生物多样性[J]. 微生物学通报, 2017, 44(9): 2067-2078
- [59] Fu J. *Trichoderma asperellum* to improve the saline-alkaline tolerance mechanisms of maize and its influence on soil microbial diversity[D]. Daqing: Doctoral Dissertation of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2017 (in Chinese)
付健. 木霉菌提高玉米耐盐碱机理及其对根际土壤微生物多样性的影响[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学博士学位论文, 2017
- [60] Han M. Studies on construction and immobilization of functional flora for compound microbial fertilizer in soybean[D]. Shenyang: Doctoral Dissertation of Shenyang Agricultural University, 2013 (in Chinese)
韩梅. 大豆复合微生物肥料功能菌系的构建及包埋固定化研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学博士学位论文, 2013
- [61] He Y, Lin QS, Hao WN, et al. Research advances and application prospect of biological immobilization[J]. Biotechnology Bulletin, 2009(S1): 88-93 (in Chinese)
何玥, 林庆胜, 郝卫宁, 等. 生物固定化技术及其应用研究进展[J]. 生物技术通报, 2009(S1): 88-93

- [62] Kumar A, Bhoot N, Soni I, et al. Isolation and characterization of a *Bacillus subtilis* strain that degrades endosulfan and endosulfan sulfate[J]. 3 Biotech, 2014, 4(5): 467-475
- [63] Onwosi CO, Odibo FJC. Rhamnolipid biosurfactant production by *Pseudomonas nitroreducens* immobilized on Ca²⁺ alginate beads and under resting cell condition[J]. Annals of Microbiology, 2013, 63(1): 161-165
- [64] Prabhune AA, Rao BS, Pundle AV, et al. Immobilization of permeabilized *Escherichia coli*, cells with penicillin acylase activity[J]. Enzyme & Microbial Technology, 1992, 14(2): 161-163
- [65] Han M, Li TH, Peng S, et al. Immobilization of microbial fertilizer in small spherical particles by embedding[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(4): 999-1005 (in Chinese) 韩梅, 李天华, 彭帅, 等. 微生物肥料的包埋固定化研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(4): 999-1005
- [66] Cao Y, Wang YY, Xu XY, et al. Compound microbial organic fertilizer for improvement of saline-alkali soil and preparation method thereof: China, CN104945188A[P]. 2015-09-30 (in Chinese) 曹勇, 王营营, 许新宜, 等. 适用于盐碱地改良的复合微生物有机肥及其制备方法: 中国, CN104945188A[P]. 2015-09-30
- [67] Wu ZS, Zhao YF, Kaleem I, et al. Preparation of calcium-alginate microcapsuled microbial fertilizer coating *Klebsiella oxytoca* Rs-5 and its performance under salinity stress[J]. European Journal of Soil Biology, 2011, 47(2): 152-159
- [68] Wang J, Fang R, Jiang QY, et al. Effects of carrier and protective agent on the biological activities of *Pseudomonas aurantiaca* JD37 strain microbial fertilizer[J]. Journal of Shanghai Normal University (Natural Sciences), 2012, 41(2): 179-185 (in Chinese) 王婧, 方蕊, 蒋秋悦, 等. 载体和保护剂对桔黄假单胞菌 JD37 微生物肥料活性的影响[J]. 上海师范大学学报: 自然科学版, 2012, 41(2): 179-185
- [69] Zhao L, Li SS, Jin Q, et al. The effect of combination of *Pseudomonas aurantiaca* JD37 and LaCl₃ on the spinach growth and soil biological activities[J]. Journal of Shanghai Normal University (Natural Sciences), 2015, 44(6): 606-611 (in Chinese) 赵磊, 李颂硕, 金清, 等. 桔黄假单胞菌 JD37 与 LaCl₃ 联用对菠菜生长和土壤生物活性的作用[J]. 上海师范大学学报: 自然科学版, 2015, 44(6): 606-611
- [70] Xin SQ, Wang G, Gao Y, et al. Effects of rice seedling plantation in the saline-alkali soil after treated with PGPR strains CS2, CC9 and the amount of addition of peat[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2011, 38(7): 82-85 (in Chinese) 辛树权, 王贵, 高扬, 等. 植物促生菌 CS2、CC9 和草炭土添加量对盐碱土育秧的作用效果[J]. 广东农业科学, 2011, 38(7): 82-85
- [71] Zhao L, Wang T, Yue QL, et al. Algae microbial soil conditioner specially used for saline-alkali soil and preparation method thereof: CN, CN106588445A[P]. 2017-04-26 (in Chinese) 赵林, 王婷, 岳秋林, 等. 一种盐碱地专用海藻微生物土壤调理剂及其制备方法: 中国, CN106588445A[P]. 2017-04-26
- [72] Yan HJ, Gao ZY, Lin SH, et al. Technology of improving saline-alkaline soil with microbe fertilizer: CN, CN102910983A[P]. 2013-02-06 (in Chinese) 严慧峻, 高昭远, 林淑华, 等. 微生物肥料改良盐碱土壤技术: 中国, CN102910983A[P]. 2013-02-06
- [73] Hammer EC, Forstreuter M, Rillig MC, et al. Biochar increases arbuscular mycorrhizal plant growth enhancement and ameliorates salinity stress[J]. Applied Soil Ecology, 2015, 96: 114-121
- [74] de Roy K, Marzorati M, van den Abbeele P, et al. Synthetic microbial ecosystems: an exciting tool to understand and apply microbial communities[J]. Environmental Microbiology, 2014, 16(6): 1472-1481
- [75] Großkopf T, Soyer OS. Synthetic microbial communities[J]. Current Opinion in Microbiology, 2014, 18: 72-77
- [76] Jagmann N, Philipp B. Reprint of Design of synthetic microbial communities for biotechnological production processes[J]. Journal of Biotechnology, 2014, 192: 293-301
- [77] Fredrickson JK. Ecological communities by design[J]. Science, 2015, 348(6242): 1425-1427
- [78] van der Heijden MG, de Bruin S, Luckerhoff L, et al. A widespread plant-fungal-bacterial symbiosis promotes plant biodiversity, plant nutrition and seedling recruitment[J]. The ISME Journal, 2016, 10(2): 389-399
- [79] Timmusk S, Seisenbaeva G, Behers L. Titania (TiO₂) nanoparticles enhance the performance of growth-promoting rhizobacteria[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 617
- [80] Yasin NA, Khan WU, Ahmad SR, et al. Imperative roles of halotolerant plant growth-promoting rhizobacteria and kinetin in improving salt tolerance and growth of black gram (*Phaseolus mungo*)[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(5): 4491-4505