

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.06.004

姜焕焕, 李嘉钦, 陈刚, 等. 解磷微生物及其在盐碱土中的应用研究进展. 土壤, 2021, 53(6): 1125–1131.

## 解磷微生物及其在盐碱土中的应用研究进展<sup>①</sup>

姜焕焕<sup>1,2</sup>, 李嘉钦<sup>1</sup>, 陈刚<sup>1</sup>, 王通<sup>2</sup>, 迟晓元<sup>2</sup>, 祁佩时<sup>3</sup>

(1 肇庆学院生命科学学院, 广东肇庆 526061; 2 山东省花生研究所, 山东青岛 266100; 3 哈尔滨工业大学环境学院, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 解磷微生物能够将土壤中难溶性磷酸盐转化为可供植物吸收利用的磷, 在提高土壤有效磷含量、缓解植物盐碱胁迫损伤及修复盐碱土中表现出良好的应用前景。本文从解磷微生物的研究及应用现状入手, 综述了盐碱土中解磷微生物的分离、解磷机制, 同时阐述了盐碱耐受性和解磷能力关系及其在盐碱土修复中的应用进展, 以期利用耐盐碱解磷菌缓解植物盐胁迫损伤及修复盐碱土提供重要参考。

**关键词:** 解磷微生物; 耐盐碱; 盐碱土; 修复

**中图分类号:** S154.39 **文献标志码:** A

### Phosphate Solubilizing Microorganisms and Application Progress in Saline-alkaline Soil

JIANG Huanhuan<sup>1,2</sup>, LI Jiaqin<sup>1</sup>, CHEN Gang<sup>1</sup>, WANG Tong<sup>2</sup>, CHI Xiaoyuan<sup>2</sup>, QI Peishi<sup>3</sup>

(1 College of Life Sciences, Zhaoqing University, Zhaoqing, Guangdong 526061, China; 2 Shandong Peanut Research Institute, Qingdao, Shandong 266100, China; 3 School of the Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Phosphate-solubilizing microorganisms (PSMs) are a group of plant growth-promoting rhizobacteria, which can dissolve insoluble phosphates and increases P uptake by the plant as well as improve properties of saline-alkaline soil. In this article, the PSMs and their application research status were briefly reviewed. The research status of PSMs in saline-alkaline soil including the halotolerant varieties, saline-alkali tolerance, phosphate-dissolving abilities and mechanisms, especially their roles in saline-alkaline soil remediation were comprehensive reviewed. It was expected to provide an important reference for the use of saline-alkali tolerant PMS to alleviate plant damage under salt stress and remediate saline-alkali soil.

**Key words:** Phosphate-solubilizing microorganisms; Halotolerant; Saline-alkaline soil; Remediation

磷是植物生长发育所需的矿物质元素之一, 主要用于核酸、磷脂和 ATP 的合成, 并通过光合作用、生物氧化、营养物质吸收和细胞分解代谢等途径促进作物生长<sup>[1]</sup>。磷在土壤中以无机磷及有机磷的形式大量存在。其中, 无机磷主要是难溶性磷酸钙、磷灰石、磷酸铝等; 有机磷形式主要为核酸、植素、磷脂、蛋白质及代谢的磷酸盐, 约占总磷含量的 30% ~ 65%<sup>[2]</sup>。因此, 土壤中可溶性磷的含量很低, 只有很少量的磷能被植物体直接吸收利用。盐碱土是世界范围内限制农业生产的重要环境因素之一, 我国各类盐碱土总面积多达  $9.91 \times 10^7 \text{ hm}^2$ <sup>[3]</sup>。盐碱土中无机盐含量丰富, 有机质缺乏, 土壤板结, 持续施用无机磷肥导致土壤中累积大量的难溶性磷酸盐, 会使土壤进一步退化。另外, 土壤高盐度和高 pH 会降低碱性磷

酸酶等多种酶活性, 制约土壤中磷素的形态转化和有效性, 降低磷肥利用率<sup>[4]</sup>。解磷微生物, 尤其耐盐碱解磷微生物受到农业生产的高度重视。应用耐盐碱解磷微生物及其生物制剂不仅可以提供磷源, 促进作物生长; 而且可以改善土壤的理化性质, 对于盐碱土修复具有一定的作用。本文综述了近年来解磷微生物及其应用概况, 并对盐碱土中解磷微生物的分离、盐碱耐受性、解磷机制及其在盐碱土中的应用进展进行概述, 以期解磷微生物在盐碱土中的深入研究和应用提供参考。

### 1 解磷微生物定义及其生态分布

解磷微生物首次发现是在 1935 年, 前苏联学者蒙金娜从土壤中分离到一种能分解核酸和卵磷脂的

①基金项目: 肇庆学院校级项目(2020012526)、肇庆学院科研基金资助项目(190060)、大学生创新创业训练计划项目(S202010580048, S202110580049, S202110580050)、肇庆市科技计划项目((2020SN015)和 2014 年国家“万人计划”青年拔尖人才项目(W02070268)资助。  
作者简介: 姜焕焕(1989—), 女, 黑龙江肇源人, 博士, 讲师, 主要从事土壤微生物学研究。E-mail: jhh0317@163.com

巨大芽孢杆菌<sup>[5]</sup>。随后关于解磷微生物的报道越来越多。目前已鉴定出来的解磷微生物达到 36 个属, 89 种, 主要包括解磷细菌、解磷真菌和解磷放线菌<sup>[6]</sup>。土壤中解磷细菌数量比解磷真菌多, 但是解磷真菌的解磷能力一般高于解磷细菌, 而且具有遗传稳定性。此外, 也有研究表明蓝藻具有解磷能力<sup>[7]</sup>。根据作用底物磷的形式不同可分为有机磷矿化菌及无机磷溶解菌。Tao 等<sup>[8]</sup>从土壤中分离得到 5 株解磷微生物, 研究表明这些解磷微生物同时具有溶解磷酸三钙和卵磷脂的能力。土壤是微生物生活的良好场所, 解磷微生物主要分布于植物根际土壤中, 不同的土壤类型和不同作物根际土壤中解磷微生物的差异很大。土壤中解磷微生物种类和种群密度与外加磷源有关, 在同一土壤中加入磷矿粉后解磷微生物密度高于加磷酸铝或磷酸铁<sup>[9]</sup>。定殖于植物根际的解磷菌能够通过自身代谢改变土壤微环境, 在难溶性磷酸盐溶解及运输过程中起到了关键作用, 被认为是高效、经济的土壤磷素活化剂。然而解磷菌的溶磷性能不稳定, 其定殖能力和生物活性易受环境胁迫等影响。因此, 针对不同生境及土壤类型, 迫切需要分离新型高效解磷微生物, 是促进低磷土壤中植物生长的有效途径。

## 2 盐碱土中解磷微生物分离及其作用机理

### 2.1 盐碱土中解磷微生物的分离

盐碱土作为一个极端的生态系统, 分布着很多嗜盐微生物, 这些嗜盐微生物以多种分子机制适应其所处生境。在利用生物修复盐碱土的过程中, 为了最大化发挥有益菌群的可持续性和环境友好性, 有必要对这些土著的微生物进行研究。土壤 pH 会影响植物根际解磷微生物的数量<sup>[10]</sup>。Rajankar 等<sup>[11]</sup>从布尔纳河流域的盐碱土中分离出 107 株菌株, 其中 33 株(30.8%)具有溶解无机磷的能力。Naz 和 Bano<sup>[12]</sup>从巴基斯坦凯沃拉盐场分离了 3 株具有解磷能力的假单胞菌(*Pseudomonas*)。Goswami 等<sup>[13]</sup>从印度的盐碱沙漠区域分离获得了 23 株具有解磷作用的促生菌。我国盐碱土面积大、分布范围广。不同盐碱区域的解磷微生物也都得到了分离。张巍等<sup>[14]</sup>从松嫩平原部分地区盐碱土中筛选出 2 株具有耐盐碱能力解磷细菌。胡山等<sup>[15]</sup>从河西走廊盐碱土中分离得到高效解磷微生物株 *Pantoea theicola*(Y3-35), 经过培养条件优化, 其解磷量最高可达 723.34 mg/L。盐碱土中关于解磷真菌的分离报道相对较少, 但解磷量较高。如李学平等<sup>[16]</sup>从黄河三角洲盐碱土中筛选得到一株解磷塔滨曲霉菌(*Aspergillus tubingensis*), 盐浓度在 0.03 ~ 0.6 g/L 时,

其解磷量达到 338.5 ~ 523.5 mg/L。赵飞等<sup>[17]</sup>从滨海盐碱土中筛选到具有解磷能力的鳞质霉菌(*Apophysomyces* sp.), 具有较强解磷能力(246.9 mg/L)。上述耐盐碱解磷菌株可作为盐碱土微生物肥料的潜在菌种。

解磷微生物能否成功接入土壤, 主要取决于其在盐碱土中的定殖能力和生长活性。微生物只有在植物根际定殖并形成优势菌落时, 才能发挥其生物学功能, 从而促进植物生长。从特定环境、特定植物的根际土壤中分离的微生物, 与相应植物亲和性好, 更易于在根际定殖。李晓婷等<sup>[18]</sup>从碱性土壤中分离到荧光假单胞菌(*Pseudomonas fluorescense*), 并将 GFP 标记的该菌株(K3GFP)接种于碱性土壤中, 10 d 后 K3GFP 数量维持在  $2.4 \times 10^6 \sim 5.5 \times 10^6$  cfu/g, 35 d 后降到  $5.0 \times 10^3$  cfu/g。另外, 解磷微生物具有根际效应, 植物根系表面及根际土壤的解磷微生物数量比非根际多; 不同作物根际分布的解磷微生物种群多样性及密度也不同。Ponmurugan 和 Gopi<sup>[19]</sup>分别测定花生、鸭脚稗、高粱和玉米根际解磷微生物种群密度, 其结果分别为  $14.9 \times 10^5$ 、 $8.6 \times 10^5$ 、 $7.3 \times 10^5$ 、 $7.7 \times 10^5$  cfu/g 土壤(以干物质质量计), 表明花生根际解磷微生物种群密度最高, 其余 3 种作物根际微生物种群密度相对较小。微生物的定殖及其发挥作用的能力受所分离土壤环境及植物根系影响, 由于微生物的这种生态位效应, 迫切需要对盐碱土中的特定植物根际高效解磷微生物进行分离筛选。

### 2.2 解磷微生物的盐碱耐受性及其溶磷能力

微生物对盐碱的耐受能力与菌株分离环境有关。从盐碱土中筛选的解磷微生物大多都可以在中低盐条件下良好生存。例如 Nautiyal 等<sup>[20]</sup>从盐碱土中分离的解磷细菌在 NaCl 浓度 10 g/L、pH 12 条件下仍可生长。目前已报道的耐盐碱能力最强的解磷细菌为 *Kushneria* sp., 在 NaCl 浓度 20 g/L、pH 4 ~ 10 条件下仍可以生存; 其最适生长 NaCl 浓度为 6 g/L, 溶解磷酸三钙量为 283.16  $\mu\text{g/ml}$ , 溶解卵磷脂量为 47.52  $\mu\text{g/ml}$ <sup>[21]</sup>。与解磷细菌相比, 关于解磷真菌耐盐碱能力的研究报道比较少。目前报道的耐盐能力较突出的解磷真菌主要有青霉菌属(*Penicillium*)<sup>[22]</sup>, 红酵母菌(*Rhodotorula*)<sup>[23]</sup>, 木霉菌(*Trichoderma*)<sup>[24]</sup>和粉红粘帚霉(*Gliocladium roseum*)<sup>[25]</sup>。解磷微生物能够在高盐碱条件下生存的特性, 可能是由于盐碱土环境长期的自然选择结果, 微生物能够积累  $\text{K}^+$  或者产生兼容性物质以应对盐碱环境。另外, 微生物受盐分胁迫时, 细胞可通过诱导信号分子分泌氨基酸代谢物, 改变细胞膜的通透性, 以此来应对盐分胁迫后的渗透压。目前,

国内外学者在农田作物根际土壤中分离鉴定出多种耐盐碱解磷菌, 主要包括 *Bacillus*、*Pseudomonas*、*Azotobacter*、*Enterobacter*、*Arthrobacter* 等<sup>[26]</sup>。微生物的解磷量与其筛选的环境及菌株特异性相关。从盐碱土壤中筛选的解磷菌, 在盐碱条件下, 具有更好的解磷能力。Kumar 等<sup>[27]</sup>研究表明微小杆菌属 (*Exiguobacterium*) 的解磷能力随着 pH 的增加而增加; 肠杆菌 (*Enterobacter*) 在高温、高盐条件下的解磷量是正常情况下的 1.6 倍。Srinivasan 等<sup>[28]</sup>从 19 个盐碱土样中分离筛选得到 35 株解磷真菌和 23 株解磷细菌, 研究显示 NaCl 浓度低于 0.8 mol/L 时, 解磷真菌的解磷量随着 NaCl 浓度的下降而下降, 但解磷细菌的解磷能力随着 NaCl 浓度上升呈上升趋势。这是因为筛选自高盐环境中的解磷微生物, 低浓度的 NaCl 不能满足其对 Na<sup>+</sup> 的吸收, 进而降低其解磷量。Xiao 等<sup>[29]</sup>研究表明解磷真菌在 NaCl 浓度 3.5 g/L 时, 解磷量最大; NaCl 浓度继续升高, 其解磷活性下降。其原因主要是由于 Na<sup>+</sup> 浓度过高, 会增加培养液的渗透势, 从而破坏微生物细胞膜结构, 损害细胞生长; 另外过多的盐碱离子与培养基中的质子或酸根离子发生螯合作用, 进而降低解磷量。由此可以看出, 不同种属耐盐碱解磷微生物的盐碱耐受力及解磷能力存在较大差异, 其耐盐碱机制也不相同, 所以耐盐碱解磷微生物的代谢调控机制及促进盐碱土中植物生长的机制值得进一步探讨。

### 2.3 盐碱条件下解磷微生物的解磷机制

解磷微生物在盐碱土中的应用潜力与盐碱耐受性及解磷能力有直接关系。只有了解盐碱条件下解磷微生物的解磷机制, 才能最大化其解磷能力。解磷微生物细胞对磷素有固定与释放作用, 当可溶性磷酸盐进入细胞后被固定, 当细胞死亡后, 又重新释放并被植物吸收利用。目前研究表明不同解磷微生物溶解无机磷和矿化有机磷能力不同, 发生的解磷机制也不相同, 主要包括无机磷的酸解和有机磷的酶解。

无机磷的溶解主要是通过有机酸的释放, 利用有机酸的羟基或者羧基螯合与磷酸盐结合的阳离子, 进而达到解磷的目的。有机酸包括乳酸、苹果酸、草酸、琥珀酸、柠檬酸、葡萄糖酸和酮葡萄糖酸等。其中, 多以葡萄糖酸和酮葡萄糖酸为主<sup>[30]</sup>。这些有机酸在改善土壤理化性质及提高土壤微生物活性方面具有重要作用。不同菌株产生的有机酸种类不同, 同一菌株产生的有机酸种类也会受到 NaCl 影响。此外, 同一菌株对不同难溶磷源活化效率不同。Son 等<sup>[31]</sup>研究表明, 具有 NaCl 及 pH 耐受性的成团泛菌 (*Pantoea*

*agglomerans*) 在以 CaHPO<sub>4</sub>、羟磷灰石和 Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 为底物时, 解磷量分别是 1 367、1 357 和 1 312 mg/L; 但是解 AlPO<sub>4</sub> 和 FePO<sub>4</sub> 的量很低, 分别是 2 mg/L 和 19 mg/L。Wei 等<sup>[32]</sup>在解磷微生物菌肥的制作过程中发现, 解磷微生物产生的有机酸会影响堆肥过程中的微生物群落结构, 进而直接影响解磷能力。此外, 微生物会产生胞外多糖, 与金属离子形成复合体, 进而抑制难溶性磷酸盐的形成。Yi 等<sup>[33]</sup>的研究证实胞外多糖与有机酸共同作用, 达到溶解 Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 的目的。另外, 有些解磷微生物可以产生铁载体, 铁载体有助于 FePO<sub>4</sub> 中磷元素的释放<sup>[34]</sup>。有机磷的矿化主要是通过微生物产生磷酸酯酶、植酸酶及 C-P 键裂解酶。磷酸酯酶对盐碱离子及 pH 敏感。嗜碱芽孢杆菌 (*Bacillus marisflavi* FA7) 产生的磷酸酯酶在 pH 为 10.1 时, 活性最强<sup>[35]</sup>。这说明耐盐碱解磷微生物分泌的磷酸酯酶具有盐碱耐受性, 在高盐碱条件下仍具有活性。江威等<sup>[36]</sup>克隆解淀粉芽孢杆菌中磷酸酯酶 AP3 基因, 并在大肠杆菌中表达。结果表明, AP3 为碱性磷酸酯酶, 最适反应 pH 为 10.3, 具有溶解磷矿粉的能力。此外解磷微生物在根际土壤中能否解磷, 受营养物质、生理过程及生长条件影响, 但关于这方面的报道还比较少, 有待于进一步的深入研究。

## 3 解磷微生物在盐碱土中的应用

不合理的施用化学磷肥和土壤盐碱化等问题使得人地矛盾越来越尖锐。耐盐碱解磷微生物修复盐碱土集经济、环境和生态效益于一身。其在盐碱土中的应用主要是可以促进盐碱土中植物的生长, 并且通过其代谢产酸解磷机制, 降低盐碱土 pH, 提高有效磷含量, 改善盐碱土环境。

### 3.1 解磷微生物促进盐碱土中植物生长

在盐碱土中, 由于过量的 Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 等离子存在, 使得土壤中离子平衡遭到破坏, ATP 酶活性降低, 大量的 Na<sup>+</sup> 流入植物细胞内引起盐碱土中植物体内 K<sup>+</sup> 亏缺, N、P 等营养元素吸收受阻, 因此盐碱土中的植物生长发育主要受盐碱胁迫及养分吸收障碍的影响。解磷微生物能够分泌有机酸, 使其周围环境酸化, 从而降低根际土壤的 pH, 缓解盐胁迫对植物造成的损伤<sup>[37]</sup>。Sahay 和 Patra<sup>[38]</sup>利用耐盐解磷菌接种万寿菊, 进行田间试验, 结果表明对照条件下万寿菊的株高为 67.0 cm, 分支数为 22.0; 经过菌株 RS-1 处理后其高度和分枝数分别为 77.2 cm、29.8; 经菌株 RS-2 处理后其高度和分枝数分别为 85.8 cm、30.3; 经过菌株 RS-3 处理后其高度和分枝数分

别为 84.5 cm、30.0; 3 株解磷微生物都不同程度地促进了盐条件下万寿菊的生长。另外, 解磷微生物及其代谢产物能够诱导植物对盐碱胁迫的天然防御机制, 分泌生长激素及抗氧化物质, 进而减轻盐碱胁迫对植物的损伤。Radhakrishnan 等<sup>[39]</sup>接种腐质霉(*Humicola*)和镰孢菌(*Fusarium*), 发现大豆抗氧化酶活性及水杨酸含量增加, 促进了盐碱条件下大豆生长。解磷微生物作为一类根际促生菌, 其在逆境胁迫的条件下也会分泌 IAA、铁载体、ACC 脱氢酶、胞外多糖等诱导性物质, 增强植物的盐碱耐受性, 促进植物生长。Zhao 和 Zhang<sup>[40]</sup>在盐碱条件下接种木霉(*Trichoderma asperellum*), 黄瓜种子的 IAA、ABA 和 GA 含量分别增加了 62.7%、43.7% 和 69.6%, 种子长度增加了 61.5%。Ramadoss 等<sup>[41]</sup>在玉米根际接种具有溶磷, 分泌 IAA、ACC 脱氢酶的耐盐促生菌, 缓解了盐离子对植株的损伤, 促进了玉米生长。此外, 解磷微生物还可以和其他微生物协同作用, 促进盐碱土中植物生长。Prasad 等<sup>[42]</sup>用解磷微生物和菌根真菌混合接种处

理玫瑰, 结果显示, 玫瑰植株的干物质量比单独接种菌根真菌增加了 33.0%, 同时增加了矿物质元素含量和玫瑰精油的产量, 促进了盐碱土中玫瑰的生长。随着分子生物学技术的发展, 微生物缓解植物盐碱胁迫损伤的分子机理逐渐被关注。Barnawal<sup>[43]</sup>通过对小麦根际接种原生节杆菌(*Arthrobacter protophormiae*)的研究表明, 盐胁迫相关基因 *CTR1* 和 *DREBs* 发生上调表达, 增加了小麦在盐碱条件下的存活率。Gond 等<sup>[44]</sup>在玉米根部接种巨大芽孢杆菌(*Bacillus megaterium*)和成团泛菌(*Pantoea agglomerans*), 发现玉米根部质膜内的水通道蛋白基因上调表达, 增加了玉米的抗盐碱胁迫能力。

以上研究表明, 解磷微生物通过多种机制促进盐碱条件下作物的生长。目前耐盐碱解磷微生物的应用受到了广泛关注, 在盐碱土条件下, 通过接种耐盐碱解磷微生物, 已经成功促进了多种植物的生长(表 1)。毋庸置疑, 解磷微生物在溶解难溶磷和提高盐碱土中作物产量方面潜力巨大。

表 1 解磷微生物促进盐碱土中植物生长  
Table 1 Phosphate solubilizing microorganisms promote plant growth in saline-alkaline soils

解磷微生物	植物	土壤	促生结果	文献	
解磷细菌	芽孢杆菌/微小杆菌	薄荷	盐土	增加了植株鲜物质量、叶/茎、含油量、植株产量	[45]
	荧光假单胞菌、微小杆菌	罗勒	盐土	提高植株 N、P、K 含量	[46]
	洋葱伯克霍尔德氏菌	玉米	碱土	增加了植株高度、干物质量、叶片面积、根/茎	[47]
	枯草芽孢杆菌	茴香	盐土	增加精油含量, 分支数, 植株 N、P、K 含量	[48]
	芽孢杆菌、假单胞菌	玉米	碱土	增加植株营养元素含量	[49]
	枯草芽孢杆菌、类芽孢杆菌	棉花	碱土	增加根、茎鲜物质量, 干物质量, 根/茎	[50]
解磷真菌	荧光假单胞菌	小麦	盐土	增加株高、生物量、脯氨酸量、抗氧化酶活性	[51]
	塔滨曲霉菌	小麦	盐碱土	增加茎长、茎鲜物质量、根长	[16]
	草酸青霉菌	玉米	盐土	增加玉米株高、根干物质量、植株干物质量	[22]
	木霉	黄瓜	水培	增加根长及鲜物质量、根活力	[40]
酵母菌	粉状毕赤酵母	大豆	盐土	增加生物量和重量、植株 P 含量	[52]

### 3.2 解磷微生物改良盐碱土土质

土壤盐碱度影响到微生物活性和有机质含量, 关系着土壤养分元素的固定、释放和迁移。解磷微生物代谢过程中会产生大量低分子量有机酸, 降低土壤 pH, 提高土壤矿物质溶解性, 增加土壤养分<sup>[53]</sup>; 另外, 有机酸溶解难溶性磷酸盐, 同时释放与  $\text{PO}_4^{3-}$  结合的  $\text{Ca}^{2+}$ , 降低可交换性  $\text{Na}^+$  浓度, 从而降低土壤碱化程度。Sahay 和 Patra<sup>[38]</sup>研究显示, 在盐碱土中接种解磷微生物, 土壤有效氮、磷、钾含量增加, pH 由 8 下降至 5, 交换性钠含量由 43 cmol/kg 下降到 38 cmol/kg。Adnan 等<sup>[54]</sup>研究证实接种解磷微生物能够消除土壤钙化对有效磷的拮抗作用, 增加了碱性土壤

中有效磷含量。另外, 解磷微生物能够促进土壤中有有机质的合成。Singh 和 Reddy<sup>[55]</sup>将草酸青霉菌接种于 pH 为 8.1 的碱土中, 结果显示, 碱土中有效磷含量和有机碳水平显著增加。此外, 解磷微生物在盐碱土中能通过自身生命活动产生多种酶, 进而改善土壤酶活。Sahay 等<sup>[46]</sup>在钠质土壤中, 利用耐盐解磷微生物 RS-1、RS-2 和 RS-3 接种万寿菊, 进行田间试验, 结果改善了土壤的理化性质和生物学性质, 增加了土壤脱氢酶的活性, 其中 RS-3 处理条件下比对照的脱氢酶活性增加最多, 达到 38%。解磷微生物能够与盐生植物联合作用, 达到改良盐碱土的目的。赵飞等<sup>[56]</sup>利用丛枝菌根真菌(AMF)及解磷真菌 *Apophysomyces*

sp. 的混合菌剂与生物质炭联合施用,在一定程度上提高滨海盐土的有机碳、碱解氮、有效磷含量,同时增加了海滨锦葵(*Kosteletzkya virginica*)的生物量。另外,解磷微生物的解磷是一个动态过程,受土壤中可降解有机物含磷量的影响。外加无机磷源和解磷微生物会产生协同作用,增强解磷微生物在盐碱土中的应用潜力。磷石膏含有钙、磷、硫等植物营养元素,具有酸性作用,能够降低土壤 pH,提高磷等养分,是有效改良剂<sup>[57]</sup>。Al-Enazy 等<sup>[58]</sup>研究表明,耐盐碱解磷微生物与磷石膏共同作用,显著增加了土壤可溶性磷含量、土壤可培养微生物数量及脱氢酶活性,土壤 pH 从 7.44 降到 7.2。赵国杰等<sup>[59]</sup>利用土柱试验证实,解磷菌与磷石膏混合施用,盐碱土微生物生物量、土壤酶活和理化性质均得到改善,土壤质量显著提高。耐盐碱解磷微生物在盐碱条件下发挥解磷能力,有效促进盐碱土的增肥及修复,提高盐碱土中作物产量,具有良好的生态和经济效益。所以,为进一步提高盐碱土的改良效果,迫切需要对高效耐盐碱解磷微生物进行深入研究。

#### 4 总结及展望

盐碱土作为一种特殊的土壤环境,分布着各种耐盐碱解磷微生物。解磷微生物对改良盐碱土及保持农业生态环境的平衡具有重要的经济和生态效益。尽管解磷微生物在植物根际土壤中大量存在,但作为生物菌剂改良盐碱土或者固定土壤中的磷素尚未成功得到全面的农业应用,而且,目前解磷微生物多用于对废水的处理和修复土壤重金属污染的研究,关于其在盐碱土修复中的作用机制及应用研究比较少。因此今后应该加强以下几方面的研究:

1) 由于目前筛选出的解磷微生物其耐盐碱能力普遍不高,因此应加大对盐碱土中原位解磷微生物的分离,才能最大化地应用于盐碱土。

2) 从酶学、分子生物学及菌落生态学等方面进一步加强解磷微生物解盐促生的机理研究,并通过基因工程手段构建高效的耐盐碱解磷微生物。

3) 由于一株解磷微生物可能具有多种特性,因此应加强对有效解磷微生物多种促生特性的研究,挖掘其在盐碱土修复中的机制和主要特性,为其在盐碱土中的应用提供依据。

4) 在微生物肥料开发利用方面,选择可以改善盐碱土壤的有机质,配合解磷菌的作用,可以更加高效地改良盐碱土壤。

#### 参考文献:

- [1] Kayasth M, Kumar V, Gera R, et al. Isolation and characterization of salt tolerant phosphate solubilizing strain of *Pseudomonas* sp. from rhizosphere soil of weed growing in saline field[J]. *Annals of Biology*, 2013, 29(2): 224–227.
- [2] 严玉鹏, 王小明, 刘凡, 等. 有机磷与土壤矿物相互作用及其环境效应研究进展[J]. *土壤学报*, 2019, 56(6): 1290–1299.
- [3] 范延辉, 王君, 刘雪红, 等. 一株耐盐解磷真菌的筛选、鉴定及其发酵优化[J]. *土壤通报*, 2015, 46(2): 362–367.
- [4] 高珊, 杨劲松, 姚荣江, 等. 改良措施对苏北盐渍土盐碱障碍和作物磷素吸收的调控[J]. *土壤学报*, 2020, 57(5): 1219–1229.
- [5] Behera B C, Singdevsachan S K, Mishra R R, et al. Diversity, mechanism and biotechnology of phosphate solubilising microorganism in mangrove—A review[J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2014, 3(2): 97–110.
- [6] 于海洋, 周方园, 李凤, 等. 解磷微生物及其在土壤污染防治中的应用研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2020, 43(S1): 44–51.
- [7] Sharma S B, Sayyed R Z, Trivedi M H, et al. Phosphate solubilizing microbes: Sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils[J]. *SpringerPlus*, 2013, 2(1): 587.
- [8] Tao G C, Tian S J, Cai M Y, et al. Phosphate-solubilizing and -mineralizing abilities of bacteria isolated from soils[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(4): 515–523.
- [9] Gupta M, Kiran S, Gulati A, et al. Isolation and identification of phosphate solubilizing bacteria able to enhance the growth and aloin-A biosynthesis of *Aloe barbadensis* Miller[J]. *Microbiological Research*, 2012, 167(6): 358–363.
- [10] 李慧敏, 王瑞, 施卫明, 等. 菜地土壤解磷微生物特征及其在磷形态转化调控中的作用[J]. *土壤*, 2020, 52(4): 668–675.
- [11] Rajankar P N, Tambekar D H, Wate S R. Study of phosphate solubilization efficiencies of fungi and bacteria isolated from saline belt of purna river basin[EB/OL]. 2007.
- [12] Naz I, Bano A. Biochemical, molecular characterization and growth promoting effects of phosphate solubilizing *Pseudomonas* sp. isolated from weeds grown in salt range of Pakistan[J]. *Plant and Soil*, 2010, 334(1/2): 199–207.
- [13] Goswami D, Dhandhukia P, Patel P, et al. Screening of PGPR from saline desert of Kutch: Growth promotion in *Arachis hypogea* by *Bacillus licheniformis* A2[J]. *Microbiological Research*, 2014, 169(1): 66–75.
- [14] 张巍, 冯玉杰, 胡纯国, 等. 耐盐碱解磷菌的分离鉴定及解磷能力研究[J]. *土壤通报*, 2009, 40(3): 572–575.
- [15] 胡山, 牛世全, 龙洋, 等. 河西走廊盐碱土壤中一株高效溶磷菌的鉴定及条件优化[J]. *微生物学通报*, 2017, 44(2): 358–365.

- [16] 李学平, 谢文军, 范延辉. 盐碱地塔宾曲霉菌的解磷能力及其对小麦生长的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1): 93–96.
- [17] 赵飞, 宰学明, 李思宇, 等. 木醋液对滨海盐土解磷真菌 *Apophysomyces* sp.SM-1 生长代谢及其溶磷效果的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(5): 135–140.
- [18] 李晓婷, 董彩霞, 杨兴明, 等. 解磷细菌 *K<sub>3</sub>* 的 GFP 标记及其解磷能力检测[J]. 土壤, 2010, 42(4): 548–553.
- [19] Ponmurugan P, Gopi C. Distribution pattern and screening of phosphate solubilizing bacteria isolated from different food and forage crops[J]. Journal of Agronomy, 2006, 5(4): 600–604.
- [20] Nautiyal C S, Bhadauria S, Kumar P, et al. Stress induced phosphate solubilization in bacteria isolated from alkaline soils[J]. FEMS Microbiology Letters, 2000, 182(2): 291–296.
- [21] Zhu F L, Qu L Y, Hong X G, et al. Isolation and characterization of a phosphate-solubilizing halophilic bacterium *Kushneria* sp. YCWA18 from daqiao saltern on the Coast of Yellow Sea of China[J]. Evidence Based Complementary and Alternative Medicine, 2011, 2011: 615032.
- [22] 李学平, 任加云, 邹美玲, 等. 一株耐盐解磷菌的解磷能力及对玉米敏感期生长的影响[J]. 水土保持研究, 2015, 22(5): 276–278.
- [23] New M T, Yu S S, Latt Z K. Study on phosphate solubilization of salt tolerant soil yeast isolates and effects on maize germination and growth[J]. International Journal of Advances in Applied Sciences, 2013, 2(3): 157–164. DOI:10.11591/ijaas.v2i3.5903.
- [24] Mundra S, Arora R, Stobdan T. Solubilization of insoluble inorganic phosphates by a novel temperature-, pH-, and salt-tolerant yeast, *Rhodotorula* sp. PS4, isolated from seabuckthorn rhizosphere, growing in cold desert of Ladakh, India[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2011, 27(10): 2387–2396.
- [25] Morales A, Alvear M, Valenzuela E, et al. Screening, evaluation and selection of phosphate-solubilising fungi as potential biofertiliser[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2011, 11(4): 89–103.
- [26] Tchakounté G V T, Berger B, Patz S, et al. Selected rhizosphere bacteria help tomato plants cope with combined phosphorus and salt stresses[J]. Microorganisms, 2020, 8(11): 1844.
- [27] Kumar A, Bhargava P, Rai L C. Isolation and molecular characterization of phosphate solubilizing *Enterobacter* and *Exiguobacterium* species from paddy fields of Eastern Uttar Pradesh, India[J]. African Journal of Microbiology Research, 2010, 4(9): 820–829.
- [28] Srinivasan R, Yandigeri M S, Kashyap S, et al. Effect of salt on survival and P-solubilization potential of phosphate solubilizing microorganisms from salt affected soils[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2012, 19(4): 427–434.
- [29] Xiao C Q, Chi R, Li X H, et al. Biosolubilization of rock phosphate by three stress-tolerant fungal strains[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2011, 165(2): 719–727.
- [30] Onireti O O, Lin C X, Qin J H. Combined effects of low-molecular-weight organic acids on mobilization of arsenic and lead from multi-contaminated soils[J]. Chemosphere, 2017, 170: 161–168.
- [31] Son H J, Park G T, Cha M S, et al. Solubilization of insoluble inorganic phosphates by a novel salt- and pH-tolerant *Pantoea agglomerans* R-42 isolated from soybean rhizosphere[J]. Bioresource Technology, 2006, 97(2): 204–210.
- [32] Wei Y Q, Zhao Y, Shi M Z, et al. Effect of organic acids production and bacterial community on the possible mechanism of phosphorus solubilization during composting with enriched phosphate-solubilizing bacteria inoculation[J]. Bioresource Technology, 2018, 247: 190–199.
- [33] Yi Y M, Huang W Y, Ge Y. Exopolysaccharide: a novel important factor in the microbial dissolution of tricalcium phosphate[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2008, 24(7): 1059–1065.
- [34] Vassilev N, Vassileva M, Nikolaeva I. Simultaneous P-solubilizing and biocontrol activity of microorganisms: Potentials and future trends[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2006, 71(2): 137–144.
- [35] Prabhu N, Borkar S, Garg S. Phosphate solubilization mechanisms in alkaliphilic bacterium *Bacillus marisflavi* FA7[J]. Current Science, 2018, 114(4): 845.
- [36] 江威, 吴秋兰, 窦欣, 等. 解淀粉芽孢杆菌 YP6 中碱性磷酸酯酶 AP3 的酶学性质及其溶磷作用[J]. 微生物学通报, 2018, 45(7): 1408–1415.
- [37] Khan A A, Jilani G, Akhtar M S, et al. Phosphorus solubilizing bacteria: Occurrence, mechanisms and their role in crop production[J]. International Journal of Agriculture and Biology, 2009, 1(1): 48–58.
- [38] Sahay R, Patra D D. Identification and performance of stress-tolerant phosphate-solubilizing bacterial isolates on *Tagetes minuta* grown in sodic soil[J]. Soil Use and Management, 2013, 29(4): 494–500.
- [39] Radhakrishnan R, Khan A L, Kang S M, et al. A comparative study of phosphate solubilization and the host plant growth promotion ability of *Fusarium verticillioides* RK01 and *Humicola* sp. KNU01 under salt stress[J]. Annals of Microbiology, 2015, 65(1): 585–593.
- [40] Zhao L, Zhang Y Q. Effects of phosphate solubilization and phytohormone production of *Trichoderma asperellum* Q1 on promoting cucumber growth under salt stress[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(8): 1588–1597.
- [41] Ramadoss D, Lakkineni V K, Bose P, et al. Mitigation of salt stress in wheat seedlings by halotolerant bacteria isolated from saline habitats[J]. SpringerPlus, 2013, 2(1): 6.
- [42] Prasad A, Kumar S, Pandey A, et al. Microbial and chemical sources of phosphorus supply modulate the yield and chemical composition of essential oil of rose-scented

- Geranium (Pelargonium species)* in sodic soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, 48(1): 117–122.
- [43] Barnawal D, Bharti N, Pandey S S, et al. Plant growth-promoting rhizobacteria enhance wheat salt and drought stress tolerance by altering endogenous phytohormone levels and TaCTR1/TaDREB2 expression[J]. *Physiologia Plantarum*, 2017, 161(4): 502–514.
- [44] Gond S K, Torres M S, Bergen M S, et al. Induction of salt tolerance and up-regulation of aquaporin genes in tropical corn by rhizobacterium *Pantoea agglomerans*[J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2015, 60(4): 392–399.
- [45] Bharti N, Barnawal D, Awasthi A, et al. Plant growth promoting rhizobacteria alleviate salinity induced negative effects on growth, oil content and physiological status in *Mentha arvensis*[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2014, 36(1): 45–60.
- [46] Sahay R, Patra D D. Identification and performance of sodicity tolerant phosphate solubilizing bacterial isolates on *Ocimum basilicum* in sodic soil[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 71: 639–643.
- [47] Zhao K, Penttinen P, Zhang X P, et al. Maize rhizosphere in Sichuan, China, hosts plant growth promoting *Burkholderia cepacia* with phosphate solubilizing and antifungal abilities[J]. *Microbiological Research*, 2014, 169(1): 76–82.
- [48] Mishra B K, Meena K K, Dubey P N, et al. Influence on yield and quality of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) grown under semi-arid saline soil, due to application of native phosphate solubilizing rhizobacterial isolates[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 97: 327–333.
- [49] Al-Enazy A A R, Al-Oud S S, Al-Barakah F N, et al. Role of microbial inoculation and industrial by-product phosphogypsum in growth and nutrient uptake of maize (*Zea mays* L.) grown in calcareous soil[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017, 97(11): 3665–3674.
- [50] Ahmad M, Ahmad I, Hilger T H, et al. Preliminary study on phosphate solubilizing *Bacillus subtilis* strain Q3 and *Paenibacillus* sp. strain Q6 for improving cotton growth under alkaline conditions[J]. *PeerJ*, 2018, 6: e5122.
- [51] Kadmiri I M, Chaouqui L, Azaroual S E, 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.
- [52] Zhu H J, Sun L F, Zhang Y F, et al. Conversion of spent mushroom substrate to biofertilizer using a stress-tolerant phosphate-solubilizing *Pichia farinose* FL7[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 111: 410–416.
- [53] Wan W J, Qin Y, Wu H Q, et al. Isolation and characterization of phosphorus solubilizing bacteria with multiple phosphorus sources utilizing capability and their potential for lead immobilization in soil[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2020, 11: 752.
- [54] Adnan M, Shah Z, Fahad S, et al. Phosphate-solubilizing bacteria nullify the antagonistic effect of soil calcification on bioavailability of phosphorus in alkaline soils[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 16131.
- [55] Singh H, Reddy M S. Effect of inoculation with phosphate solubilizing fungus on growth and nutrient uptake of wheat and maize plants fertilized with rock phosphate in alkaline soils[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2011, 47(1): 30–34.
- [56] 赵飞, 刘畅, 朱昌玲, 等. 功能微生物与生物炭对海滨锦葵生长及滨海盐土地力的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2020(5): 161–168.
- [57] 王相平, 杨劲松, 张胜江, 等. 石膏和腐植酸配施对干旱盐碱区土壤改良及棉花生长的影响[J]. *土壤*, 2020, 52(2): 327–332.
- [58] Al-Enazy A A, Al-Barakah F, Al-Oud S, et al. Effect of phosphogypsum application and bacteria co-inoculation on biochemical properties and nutrient availability to maize plants in a saline soil[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2018, 64(10): 1394–1406.
- [59] 赵国杰, 牛世全, 达文燕, 等. 四株无机解磷菌处理碱化土壤的理化性质及质量评价[J]. *土壤通报*, 2014, 45(4): 996–1002.