

重金属胁迫下土壤微生物对植物促生机制的研究进展

王静 (安徽众欣环境科技有限公司, 安徽合肥 230041)

摘要 土壤微生物不仅可以有效改善土壤环境, 还可以提高植物修复重金属的效率, 在土壤重金属污染治理中具有广泛的应用前景。对重金属胁迫下土壤微生物对植物的促生机制和作用做了研究综述。

关键词 重金属污染; 促生特性; 促生菌(PGPR); 丛枝菌根真菌(AMF)

中图分类号 S154.3 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2019)17-0025-03

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2019.17.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Advances on the Mechanism of Soil Microorganisms Promoting Plant Growth under Heavy Metal Stress

WANG Jing (Anhui Zhongxin Environmental Technology Co., Ltd., Hefei, Anhui 230041)

Abstract Soil microorganisms can not only effectively improve the soil environment, but also improve the efficiency of phytoremediation of heavy metals, which has a broad application prospect in the treatment of soil heavy metal pollution. In this paper, the effects of soil microorganisms on plant growth under heavy metal stress were reviewed.

Key words Heavy metals; Promoting properties; Growth promoting bacteria (PGPR); Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF)

由于工业和农业的快速发展, 土壤中重金属污染愈发严重, 重金属因其隐蔽性、长期性、不可降解等特点成为环境治理的难点^[1]。植物修复是一种绿色、环保、可持续的原位修复方式, 被大力提倡应用到土壤重金属的修复中, 但超富集植物或高富集植物通常具有生物量小、生长周期长等缺点, 很难在短期内达到预期的修复效果^[2]。

微生物广泛存在于土壤生态系统中, 在能量流动、营养循环和物质转化等过程有着不可替代的作用^[3]。其中一些具有重金属抗性的微生物(根际细菌和菌根真菌等), 不仅可以促进植物营养吸收, 还可以改变重金属的分布^[4]。土壤为细菌和真菌提供了生存环境, 而细菌和真菌对有害物质又非常敏感^[5]。因此, 将微生物应用到植物修复中不仅可以有效地提高修复土壤重金属污染的效率, 还可以改善土壤环境。

细菌是土壤环境中数量最多的微生物, 其中植物促生菌(PGPR)可以通过分泌吲哚乙酸(IAA)、1-氨基环丙烷-1-羧酸(ACC)脱氢酶, 产铁载体, 溶磷等作用而促进植物生长^[6]。并且在干旱、高盐碱、重金属和有机污染等恶劣环境下也可以促进植物生长^[7]。曹阳等^[8]从焦化厂区土壤中分离筛选的芽孢杆菌属、假单胞菌属和鞘氨醇菌属不仅具有分泌ACC的能力还具高效降解多环芳烃和萘功能。张振等^[9]筛选到1株能分泌IAA、解磷并对茈萸有降解作用的耐盐节杆菌(*Arthrobacter pascens* ZZ21)。余贤美等^[10]指出地衣芽孢杆菌CAS20促进柿树幼苗的生长, 并具有防柿树炭疽病的作用。

丛枝菌根真菌(AMF)不仅具有促进植物的水分吸收、养分获取和生长发育的作用, 还具有增强植物对重金属的抗性以及降低植物对某些重金属吸收的作用^[11-12]。Guo等^[13]研究添加*Glomus mosseae*和*Glomus versiforme*到矿区土壤对玉米和大豆生长的影响, 结果表明2种菌均可以促进植物对

NPK的吸收和生物量的增加, 降低植物根茎多种重金属(La、Ce、Pr、Nd等)浓度。Hu等^[14]采用的盆栽试验表明接种*Glomus mosseae* M47V(Gm)可以促进东南佛甲草和黑麦草生长, 并降低东南佛甲草和黑麦草对Cd的吸收。Zhang等^[15]采用盆栽试验研究在Cd胁迫下, 结果显示添加丛枝菌根真菌*Rhizophagus intraradices*(Ri)和*Glomus versiforme*(Gv)均促进对玉米生物量的增加, 并通过改变玉米体内Cd的亚细胞分布和化学形态减轻Cd的植物毒性, 降低玉米根和茎中Cd的含量。

1 微生物对植物的促生机制

1.1 分泌IAA 吲哚乙酸(IAA)是植物体内主要的一类生长素, 具有分泌IAA活性的内生细菌可通过调节植物内源激素含量或提供外源激素, 促进宿主植物的生长和发育^[16]。刘玉珍等^[17]从巨菌草中筛选分离到1株假单胞菌属YA-6同时具备分泌IAA、溶磷、固氮和产铁载体等促生能力。余水静等^[18]从赣南脐橙根际土壤中分离获得*Pantoea* sp. 菌具有较高的产IAA能力, 产量可达到33.3 mg/L。詹寿发等^[19]从钾矿区筛选分离的泡盛曲霉(*Aspergillus awamori* MQ013)和黑曲霉(*Aspergillus niger* MQ039)具有溶磷、解钾和分泌IAA能力, 并显著促进玉米幼苗的生长。

1.2 产ACC脱氢酶 乙烯可以加速植物的衰老与死亡, ACC脱氢酶能够分解乙烯合成前体ACC为 α -丁酮酸和氨, 从而有效缓解植物体内乙烯的积累, 减轻逆境下乙烯对植物的伤害, 促进植物的生长和产量的提高, 并在促进植物抗盐碱、干旱及重金属胁迫等方面都有显著作用^[20-21]。丁琳琳等^[22]从石油污染土壤中筛选分离出克雷伯氏菌(*Klebsiella* sp.)具有耐盐、溶磷产IAA和ACC能力, 促进高羊茅种子发芽率。假单胞菌属细菌(*Pseudomonas* sp.)具有产铁载体、固氮、分泌IAA、水杨酸和ACC脱氢酶等能力, 并促进丹参的生长。荧光假单胞菌生物型IV(*P. fluorescens* biovar IV) XG32菌株具ACC脱氢酶活性, 对辣椒疫霉(*Phytophthora capsici*)有拮抗作用^[24]。

作者简介 王静(1982—), 男, 安徽合肥人, 工程师, 从事环境影响评价、环保咨询和环保工程研究。

收稿日期 2019-07-01

1.3 产铁载体 铁是生物的必需元素。铁以溶解度极低 (10^{-17} mol/L) 的氧化物形式存在, 绝大多数细菌和真菌通过合成分泌与 Fe^{3+} 有高螯合能力的小分子化合物来摄取环境中的铁元素, 这类化合物就是铁载体^[25]。张孝龙等^[26]从碱性湖泊和碱性尾矿中筛选分离到4株铁载体高产菌株分别为曲霉属 (FEDT-866 和 FECH-998), 青霉属 (FECH595 和 FEDT-145), 所产铁载体类型主要为异羟肟酸型和羧酸型。赵翔等^[27]筛选出1株 Su 高达90% 高产铁载体荧光假单胞菌 (*Pseudomonas fluorescens* sp-f)。田方等^[28]研究表明, 烟草疫霉拮抗菌 (*Pseudomonas mediterranea* G-229-21T) 产生高亲和力羧酸型铁载体, 该铁载体在低铁和富铁条件下对烟草疫霉的抑制率在2.0%~92.3%。

1.4 溶磷能力 土壤中大约95%~99%的磷是不溶性的, 这些难溶态磷很难被植物直接吸收利用^[29]。溶磷微生物可把这些不溶磷转化为可溶磷, 不仅提高土壤中磷的利用率, 促进植物营养吸收, 而且可以改变重金属的形态, 提高修复效率^[30-31]。曾齐等^[32]从大豆根际分离筛选出4株高溶磷能力的菌株, 分别为黄色蓝状菌 (*Talaromyces flavus* Z2)、绳状篮状菌 (*Talaromyces funiculosus* Z3)、黑曲霉 (*Aspergillus niger* Z8)、嗜松蓝状菌 (*Talaromyces pinophilus* T4) 和糙刺蓝状菌 (*Talaromyces trachyspermus* Y2)。王勇等^[33]从柑橘根际筛选出1株同时具备溶磷解钾能力的纺锤形赖氨酸芽孢杆菌 (LW-3)。刘虎等^[34]筛选出1株阴沟肠杆菌 (*Enterobacter cloacae* JP6) 同时具备溶磷和产 IAA 能力。

2 土壤微生物对植物的作用

2.1 耐重金属作用 微生物能够抵御重金属胁迫, 改变植物对重金属的吸收和转移, 有助于超富集植物对重金属的吸收和去除, 增强植物抗病能力, 极大地提高了植物在逆境条件下的生存能^[35]。不同铀浓度的盆栽中接种木糖氧化无色杆菌, 该菌株能使苜蓿干重分别提高17.9%~110.4%; 对铀的富集率分别提高12.2%~180.6%, 有效提高苜蓿富集铀的能力^[36]。赵树民等^[37]从黑麦草 (*Lolium perenne* L.) 根际土壤中分离的巨大芽孢杆菌 (*Bacillus megaterium*) 能够分泌 IAA, 促进磷的溶解, 并提高黑麦草种子发芽率和抵抗辐射胁迫, 对 Cd^{2+} 的最大耐受质量浓度为 10 mg/L ^[37]。韩娜等^[38]指出淡紫拟青霉 A10 可以提高印度芥菜幼苗对外源 Cs^+ 的吸收。

2.2 促生作用 微生物具有分泌 IAA、ACC 脱氨酶、溶磷、固氮、解钾和产铁载体等能力, 可以促进植物对营养物质的吸收^[39]。固氮菌 XD20 均能促进不同品种甘蔗的生长, 提高其生物量和叶绿素含量以及其他生理生化指标^[40]。AM 真菌摩西斗管囊霉、哈茨木霉 (LTR-2)、巨大芽孢杆菌 (B130-1) 和根内根包囊霉及其组合组合均可促进烟草幼苗生长^[41]。砂生槐根瘤内生细菌 R24 能明显提高砂生槐种子的萌发率, 具有良好促生能力^[42]。木霉 T6 与青霉 K 能够显著增加幼苗根长、株高、鲜干重及叶绿素含量, 协同促进小麦和白菜幼苗的生长^[43]。

2.3 生物防治作用 植物病原体能侵害植物, 造成植物生

长失调, 甚至导致植物死亡, 微生物可通过多种作用来抑制或减轻植物根际病原微生物生长及虫害的发生, 间接促进植物的生长^[44]。王欢等^[45]筛选到1株枯草芽胞杆菌 (*Bacillus subtilis* 8-32) 可抑制多种植物病原菌孢子萌发、芽管及菌丝生长。李海云等^[46]从蔬菜根际筛选出 NCRP2 菌株对小麦长蠕孢病菌 *Helminthosporium tritici-vulgaris*、番茄早疫病菌 *Alternaria solani* 和黄瓜枯萎病菌 *Fusarium oxysporum* 等6种病菌均有抑制作用。吡咯伯克霍尔德菌 (*Burkholderia pyrrocinia* WY6-5) 可分泌出一种挥发性抑菌物质——二甲基二硫, 经研究表明该物质可高效抑制8种植物病原真菌的生长^[47]。芽孢杆菌对镰刀菌、紫青霉菌、白色念珠菌等植物病原菌都有拮抗作用^[48]。明檀香内生部分真菌具有较好的抗菌能力^[49]。

2.4 其他作用 微生物对植物具有除了具有以上作用, 还具有耐盐、耐碱、耐温度及耐旱性等其他抗逆性。在干旱胁迫下接种蜡样芽孢杆菌 (*Bacillus cereus* F06) 可调节植物体内的激素含量, 减少干旱胁迫下光合色素的分解或流失, 提高光合速率, 增强水稻在干旱环境中的适应能力^[50]。邓超等^[51]研究表明产 ACC 的菌株对重瓣百合切花有保鲜、延缓衰老进程的作用。植物根际促生菌 Gny1 菌株对温度和 pH 有良好的耐受性^[52]。申枚灵等^[53]从新疆塔里木盆地的光果甘果筛选的内生菌链霉菌属不仅具有多种促生特性, 还具备耐盐、耐碱及耐旱性。巩文峰等^[54]指出粘着箭菌 (*Ensifer adhaerens*) 耐低温。

3 结论

在各种修复方法中, 植物-微生物联合修复技术因其相对破坏性小、修复高效且对环境无二次污染等优势成为国内外土壤修复领域的研究热点。在今后应重点关注两方面研究: 其一, 微生物、植物和土壤是一个极其复杂体系, 加强探索三者之间的相互作用机制^[55]; 其二, 继续筛选分离出修复效果更强的、对环境适应能力更强的、具有多种重金属抗性的微生物^[56]。

参考文献

- [1] ASHRAF S, ALI Q, ZAHIR Z A, et al. Phytoremediation: Environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils[J]. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2019, 174: 714-727.
- [2] 魏本杰, 曾晓希, 刘志成, 等. 产铁载体菌的筛选鉴定及活化镉的性能探究[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(11): 26-31.
- [3] MARCIN C, MARCIN G, JUSTYNA M P, et al. Diversity of microorganisms from forest soils differently polluted with heavy metals[J]. *Applied soil ecology*, 2013, 64: 7-14.
- [4] 宋玉婷, 雷泞菲, 李淑丽. 植物修复重金属污染土地的研究进展[J]. *国土资源科技管理*, 2018, 35(5): 58-68.
- [5] DENG L J, ZENG G M, FAN C Z, et al. Response of rhizosphere microbial community structure and diversity to heavy metal co-pollution in arable soil[J]. *Applied microbiology and biotechnology*, 2015, 99(19): 8259-8269.
- [6] BURD G I, DIXON D G, GLICK B R. Plant growth-promoting bacteria that decrease heavy metal toxicity in plants[J]. *Can J Microbiol*, 2000, 46(3): 237-245.
- [7] 彭云霄. 根际促生细菌提高植物抗重金属能力的研究进展[J]. *云南化工*, 2019, 46(2): 36-38.
- [8] 曹阳, 宋立超, 钮旭光, 等. 焦化厂地肤根内解砷细菌的筛选及促生潜力[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(6): 2056-2062.
- [9] 张振, 李辉信, 陈雄, 等. 一株具有蒽萘降解能力的产吡啶乙酸的筛选鉴定及其特性[J]. *环境工程学报*, 2014, 8(11): 5041-5048.

- [10] 余贤美,侯长明,张坤鹏,等.嗜铁细菌地衣芽孢杆菌 CAS20 对柿树的防病促生作用[J].山东农业科学,2019,51(5):120-124.
- [11] BLAUDEZ D,BOTTON B,CHALOT M. Cadmium uptake and subcellular compartmentation in the ectomycorrhizal fungus *Paxillus involutus* [J]. *Microbiology*,2000,146(Pt 5):1109-1117.
- [12] 陈保冬,张莘,伍松林,等.丛枝菌根影响土壤-植物系统中重金属迁移转化和累积过程的机制及其生态应用[J].岩矿测试,2019,38(1):1-25.
- [13] GUO W,ZHAO R X,ZHAO W J,et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on maize (*Zea mays* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) grown in rare earth elements of mine tailings [J]. *Applied soil ecology*, 2013, 72:85-92.
- [14] HU J L,WU S C,WU F Y,et al. Arbuscular mycorrhizal fungi enhance both absorption and stabilization of Cd by Alfred stonecrop (*Sedum alfredii* Hance) and perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) in a Cd-contaminated acidic soil [J]. *Chemosphere*,2013,93(7):1359-1365.
- [15] ZHANG X F,HU Z H,YAN T X,et al. Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate Cd phytotoxicity by altering Cd subcellular distribution and chemical forms in *Zea mays* [J]. *Ecotoxicology and environmental safety*,2019,171:352-360.
- [16] 程怀月,石先阳.弗赖森森螺菌 RE3-3 合成生长素及其促生作用的研究[J].微生物学杂志,2017,37(5):20-26.
- [17] 刘玉珍,邓振山,高飞,等.一株巨菌草内生细菌的鉴定及其促生特性初步分析[J].广东农业科学,2018,45(3):88-93.
- [18] 余水静,雷强,钱佳琳,等.一株赣南脐橙根际叫唉乙酸产生菌的筛选及其发酵特征[J].江西理工大学学报,2019,40(1):30-34.
- [19] 詹寿发,卢丹妮,毛花英,等.2株溶磷、解钾与产 IAA 的内生真菌菌株的筛选、鉴定及促生作用研究[J].中国土壤与肥料,2017(3):142-151.
- [20] 姬文秀,李虎林,冷雪,等.产 ACC 脱氨酶人参内生细菌的分离和促生特性分析[J].吉林农业大学学报,2019,41(2):168-174.
- [21] 代金霞,周波,田平雅.荒漠植物柠条产 ACC 脱氨酶根际促生菌的筛选及其促生特性研究[J].生态环境学报,2017,26(3):386-391.
- [22] 丁琳琳,刘五星,孙剑英,等.产 ACC 脱氨酶植物根际促生菌的筛选及其对修复植物高羊茅生长的影响[J].土壤,2013,45(2):1271-1276.
- [23] 尤红,普倩,文芳,等. ACC 脱氨酶菌株的分离筛选及对丹参毛根根的影响[J].浙江理工大学学报(自然科学版),2017,37(5):720-726.
- [24] 沈萍,刘维红,闫淑珍,等. XG32 菌株产 ACC 脱氨酶的培养条件和酶活影响因素[J].南京师大学报(自然科学版),2008,31(1):104-108.
- [25] 赵翔,谢志雄,陈绍兴,等.适合高产铁载体细菌筛选、检测体系的改进与探析[J].微生物通报,2006,33(6):95-98.
- [26] 张孝龙,王永霞,赵江源,等.四株碱性环境真菌铁载体活性筛选[J].微生物学报,2016,56(6):1022-1033.
- [27] 赵翔,陈绍兴,谢志雄,等.高产铁载体荧光假单胞菌 *Pseudomonas fluorescens* sp-f 的筛选鉴定及其铁载体特性研究[J].微生物学报,2006,46(5):691-695.
- [28] 田方,丁延芹,朱辉,等.烟草根际铁载体产生菌 G-229-21T 的筛选、鉴定及拮抗机理[J].微生物学报,2008,48(5):631-637.
- [29] ELIAS F,WOYESSA D,MULETA D. Phosphate solubilization potential of rhizosphere fungi isolated from plants in Jimma Zone, Southwest Ethiopia [J]. *International journal of microbiology*,2016,2016:1-11.
- [30] 李敏,滕泽栋,朱静,等.解磷微生物修复土壤重金属污染研究进展[J].生态学报,2018,38(10):3393-3402.
- [31] 刘晓芳,黄晓东,张芳.一株溶磷黑曲霉的溶磷特性及溶磷机制初探[J].河南农业科学,2005(6):60-62,65.
- [32] 曾齐,王继华,隋海潮,等.大豆根际溶磷真菌的筛选、复配及包埋固定化回用效果[J].分子植物育种,2019,17(10):3353-3363.
- [33] 王勇,陈燕琼,温书恒,等.一株溶磷解钾菌的分离筛选与鉴定[J].安徽农业科学,2019,47(10):5-9.
- [34] 刘虎,侯贞,易建华,等.一株烟草根际溶磷细菌的筛选鉴定及其培养基优化[J].山东农业大学学报(自然科学版),2016,47(4):514-519.
- [35] 杨晶,孟晓庆,李雪瑞.植物-微生物联合修复重金属污染土壤现状研究[J].环境科学与管理,2018,43(11):67-70.
- [36] 王焯,罗学刚,丁翰林,等.一种耐铀植物促生菌的筛选及促生特性研究[J].生物技术通报,2019,35(1):42-50.
- [37] 赵树民,虞方伯,叶正钱,等.耐镉产铁载体菌株的分离及鉴定[J].环境污染与防治,2017,39(9):999-1002.
- [38] 韩娜,陶宗姬,代文秀,等.淡紫拟青霉 A10 的促生特性及其发酵液对印度芥菜幼苗蓄积 Cs⁺ 的影响[J].农业环境科学学报,2019,38(3):485-493.
- [39] 袁金玮,陈策,陈芳,等.强化植物修复重金属污染土壤的策略及其机制[J].生物技术通报,2019,35(1):120-130.
- [40] 毛莲英,黄焯,祝开,等.固氮菌株 XD20 对不同甘蔗品种的促生效应[J].西北植物学报,2019,39(1):140-148.
- [41] 车永梅,赵方贵,陈同金,等. AM 真菌、木霉和 PGPR 组合的促生效应研究[J].青岛农业大学学报(自然科学版),2019,36(2):95-102.
- [42] 何建清,张格杰,赵伟进,等.砂生槐根瘤内生细菌多样性及其促生潜力研究[J].江苏农业科学,2019,47(12):297-301.
- [43] 任季平,李发康,丁有来,等.木霉 T6 和青霉 K 菌株混合培养的溶磷促生效应[J].草原与草坪,2019,39(2):73-78.
- [44] 瞿攀,伏毅,刘绵学,等.植物-微生物联合修复镉污染土壤研究进展[J].土壤,2019,51(1):11-18.
- [45] 王欢,贾田惠,杨可欣,等.枯草芽孢杆菌 8-32 对病原真菌的拮抗效应及对植物促生长机制[J].农业生物技术学报,2019,27(5):908-918.
- [46] 李海云,蒋永梅,姚拓,等.蔬菜作物根际促生菌分离筛选、鉴定及促生特性测定[J].植物保护学报,2018,45(4):836-845.
- [47] 宫安东,朱梓钰,路亚南,等.吡咯伯克霍罗德菌 WY6-5 的溶磷、抑菌与促玉米生长作用研究[J].中国农业科学,2019,52(9):1574-1586.
- [48] 范延辉,王君,郭洪燕,等.根际微生物 BZ-1 的分离及其抗菌促生特性[J].北方园艺,2009(10):127-128.
- [49] 刘军,刘艳明,徐在超,等.檀香内生真菌多样性及其抗菌与促生特性的研究[J].中国中药杂志,2018,43(17):3477-3483.
- [50] 陈苏,谢建坤,黄文新,等.根际促生细菌对干旱胁迫下水稻生理特性的影响[J].中国水稻科学,2018,32(5):485-492.
- [51] 邓超,邓洁,娟美,等.含 ACC 脱氨酶的植物根际促生细菌菌株对重瓣百合合 'Belonica' 采后品质及生理特性的影响[J].北方园艺,2019(12):63-67.
- [52] 李建宏,李雪萍,李昌宁,等.一株植物根际促生菌 *Gnytl* 的特性研究及分类地位的确定[J].草业学报,2019,28(5):55-67.
- [53] 申枚灵,赵翀,廖萍,等.塔里木盆地光果甘草内生放线菌的分离鉴定及抗逆、促生特性[J].草业科学,2018,35(7):1624-1633.
- [54] 巩文峰,邢瑜琪,卓玛曲措,等.一株色季拉山长鞭红景天根际溶磷菌的分离、鉴定及其低温适应性分析[J].南方农业学报,2018,49(2):280-286.
- [55] 唐小飞.植物-微生物联合修复重金属污染土壤研究进展[J].广东化工,2018,45(14):148-149,156.
- [56] 鲍桐,孙丽娜,孙铁珩,等.重金属污染土壤植物修复技术强化措施研究进展[J].环境科学与技术,2010,33(S2):458-462.