

# 植物根际促生菌的促生防病作用机制

宋 振

浙江师范大学生命科学学院, 浙江 金华

收稿日期: 2023年11月29日; 录用日期: 2024年1月5日; 发布日期: 2024年1月15日

---

## 摘要

植物根际促生菌是能够生活在植物根际环境中, 显著提高植物生长活力, 在植物表面根系定殖, 抑制病原菌防治的有益菌的统称。植物根际促生菌既能促进植物生长又可以防治植物病害, 可以规避化学农药对于土壤污染加剧和危害人畜安全等问题, 具备广阔的应用前景。本文综述了植物根际促生菌发挥促生作用的机制以及防治植物病害的机理, 旨在为植物肥料和生物农药的开发提供新思路和新途径。

---

## 关键词

植物根际生防菌, 植物肥料, 生物农药

---

# Mechanisms of Growth-Promoting and Disease-Preventive Action of Plant Growth Promoting Rhizobacteria

Zhen Song

College of Life Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

Received: Nov. 29<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jan. 5<sup>th</sup>, 2024; published: Jan. 15<sup>th</sup>, 2024

---

## Abstract

Plant growth promoting rhizobacteria are beneficial bacteria that can live in the inter-root environment of plants, significantly improve plant growth and vitality, colonize the root system on the surface of plants, and inhibit the prevention and control of pathogenic bacteria. Plant growth promoting rhizobacteria can promote plant growth, prevent plant diseases and can avoid the problems of chemical pesticides that increase soil pollution and jeopardize the safety of humans and animals, so they have a brilliant application prospect. In this paper, we reviewed the mechan-

ism of plant growth promoting rhizobacteria and the mechanism of plant disease control, aiming to provide new ideas and new ways for the development of plant fertilizers and biopesticides.

## Keywords

Plant Growth Promoting Rhizobacteria, Biopesticides, Plant Fertilizer

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

我国是人口大国，筑牢粮食安全底线是我国做好强基固本文章的重要举措，开展粮食优质高产攻关是巩固粮食安全屏障的关键保障。但是近年来由于气候因素和不合理的农业栽培措施、农药和化肥的不合理使用以及农作物病虫害逐渐增长，严重危害粮食安全底线。生物肥料是指能够促进植物生长，增加植物产量，提高植物抵御病虫害的能力的一种活体微生物肥料[1]，可以保护土壤和耕地。孟静[2]等发现植物根际促生菌 DM11 不仅能够抑制多种病原菌，还能够增加黄瓜和番茄幼苗的叶片数。刘红雨[3]等发现蜡样芽孢杆菌(*Bacillus cereus* DW019)能够抑制多种土传病原菌，且能够提高圣女果的生物量。肖薇薇[4]发现菌株 Y3 提高了镉镍复合胁迫下水稻种子的萌发率。利用根际促生菌为主体研制的微生物肥料可以改善土壤的理化性质，研制的生物农药可以防治植物病害。因此，研究植物根际促生菌的促生和防病原理和应用十分必要，但是以往的报道中植物根际促生菌对土壤的修复作用涉及较少，本文综述了植物根际促生菌的种类、作用原理、对环境的保护作用，能够为微生物资源的丰富提供理论参考和实践依据。

## 2. 植物根际促生菌

1904 年，Lorenz Hiltner 最早提出了“根际”的含义[5]。根际没有确切的界限，主要指在根部周围、性质与土壤存在不同的细微区域[6]。可以促使植株生长、抑制病原菌，提升作物产量的微生物称作植物根际促生菌(Plant Growth Promoting Rhizobacteria, PGPR)。PGPR 拥有环保、绿色可持续等优点，能够提高作物产量、改善土壤，已经应用到微生物的肥料生产中。

### 2.1. 植物根际促生菌的类型

根据植物的不同，分为根瘤菌和法兰克菌等在内的能够定殖在植物的一些组织和细胞中的 PGPR (iPGPR)，具有特化的结节状结构；此外，还有和根相邻但不接触根部、根表面吸附、在植物根皮层和细胞之间生活的 PGPR (ePGPR)。已报道 PGPR 的类型共有假单胞菌属(*Pseudomonas*)、肠杆菌属(*Enterobacter*)、农杆菌属(*Agrobacterium*)等[7] [8]。

### 2.2. 植物根际促生菌的促生机制

PGPR 的促生原理共有直接和间接方式[9]。直接方式指 PGPR 通过产生植物激素，凭借固定氮、溶解磷和溶解钾等途径增加土壤营养元素占比，提高植物活力[10]；间接方式指 PGPR 通过诱导植物分泌活性物质等途径抑制病原微生物繁殖，缓解有害作用，抑制植物病害，帮助植物生长[11]。

### 2.2.1. 固氮作用

氮是植物生长和发育中的必需元素也是限制元素[12]。PGPR 的固氮原理与其有相关基因(BNF nif)有关，是通过酶促反应将氮气转化为氨[13]。PGPR 能够将硝酸根电子受体，通过反硝化的方式转换为氮氧化合物，并最终被还原为铵根离子[14]。PGPR 也凭借硝化作用和氨化作用分泌水解酶，将氮从有机态转化成无机态[13]。具固氮菌属和布克氏菌属的根际微生物能自生固氮[15]。豆科作物的根瘤菌能够将氮源提供给宿主，也能为许多植物提供氮源，经<sup>15</sup>N 标记豆科植物白三叶中的氮元素，同黑麦草混合播种后，结果表明白三叶约 50% 的固氮量被转移至黑麦草内，供非宿主植物黑麦草所用[16]。韩梅等[17]发现内生固氮菌克雷伯氏菌(*K.trevisan*)能够促进玉米生长。

### 2.2.2. 溶磷作用

磷(phosphorus, P)是关键的营养元素，参与植物体的代谢过程，还在植物的生长、抗病能力等方面发挥作用。虽然土壤中磷元素并不缺少，但大部分以难溶的形式存在，仅有以磷酸氢根和磷酸二氢根方式存在的磷元素才能被植物吸收，在总磷含量中占比较低[18]。目前溶磷细菌有根瘤菌属等[19]，其主要通过产生有机酸、铁载体和胞外酶等物质，使磷酸三钙、羟基磷灰石等不溶磷转换成可溶性磷酸盐[20]。苏辉兰[21]等发现 W-3 菌株处理对油麦菜的促生效果最好，显著增加了油麦菜的株高、植株鲜重、干重和根干重。王君[22]等发现菌株 B19 可以溶解很多难溶性磷源，使小麦植株增长明显，表明解磷 B19 能够改良盐碱化土壤。

### 2.2.3. 解钾作用

钾能促进的酶活化，解钾菌可以将土壤中难溶的钾转换为可利用的钾的形式。主要凭借与矿物质接触的直接作用方式和产生许多物质的间接作用推动钾元素的转化。直接方式是解钾细菌凭借自己和矿物质接触，由聚集阶段、可逆附着阶段、不可逆附着阶段和生物膜形成和循环组成[12]。间接方式包括解钾细菌可产生的无机酸和有机酸以便能够通过改变环境酸碱度或凭借螯合作用等形式增加含钾难溶物的降解[12]。王彦佳[23]等发现解钾菌巨大芽孢杆菌 XLT-4 和耐寒短杆菌 XLT-7 能显著提高紫花苜蓿的株高、根长、鲜重等形态指标，还能提高根系活力、叶片的磷和钾含量。曹媛媛[24]等的研究表明 4 株烟草特异性解钾菌使烟草根系更加发达。解钾菌可帮助烟草吸收更多的土壤中的钾，从而帮助烟草生长。

### 2.2.4. 产生铁载体

铁(iron, Fe)是植物生长发育过程中的关键元素，还是植物合成叶绿素、运输物质过程中的必要因子。嗜铁素俗称铁载体，是一种小分子量的有机化合物，一般由非核糖体肽合成酶或聚酮合酶合成[25]。PGPR 可以产生较少或者不产生铁载体的病原微生物争夺铁元素，进而抑制病原菌的生长。嗜铁素可以和重金属形成稳定的化合物，能够提高植物对重金属的耐受性，缓解重金属胁迫。梁建根[26]等发现恶臭假单胞菌(*Pseudomonas putida*)菌株 HZ-2 具有较强的嗜铁素产生的能力，能够用于防治土传的植物病害。武雯雯[27]等发现假单胞菌属(*Pseudomonassp.W-STS-8*)能产嗜铁素，还对重金属具有耐受性，能在 Cd<sup>2+</sup>胁迫条件下，促进黑麦草种子萌发。

### 2.2.5. 产生促进植物生长的物质

植物激素不能直接为植物提供养分，但能够以信号分子的形式调控植物生长和发育[28]。PGPR 能够分泌多种植物激素，如生长素、赤霉素、细胞分裂素、脱落酸和乙烯等[29]。生长素使根系分泌物增加，根系长度变短，使细胞壁松弛，帮助植物吸收更多营养，提高植物对病原菌的敏感性[30]。陆娟[31]等等发现产生生长素的菌株 SA4 处理对黄瓜和玉米种子后，黄瓜和玉米的主根生长和总根增重均明显。生长素促生菌株 m53 能提高烟草种子的发芽指数和活力，能增加烟草幼苗的株高和根长等农艺指标[32]。细

胞分裂素是能够促进植物细胞分裂、伸长和一些组织器官的分化[33]，在植物种子萌发到植物衰老过程中起作用。邵兰军[34]等发现缺陷短波单孢菌(*Brevundimonas diminuta*)具有较强的细胞分裂素生产能力。田间实验表明此菌株可以高效提升烟叶开片，提升烟叶的利用效率。此外，赤霉素可以调节根毛的数量促进根的生长[11]。Kang 等[35]从土壤中筛选到一株乙酸钙不动杆菌 SE370，并将其应用于黄瓜、白菜和雏菊的促生实验中，发现其能够通过分泌赤霉素有效促进植物生长。吴秉奇等[36]在烟草根际施用多粘类芽孢杆菌 YC0136，发现其通过诱导烟草中生长素等多种植物激素相关基因的表达，进而促进烟草的长高。Joo 等[37]筛选出的根际细菌蜡样芽孢杆菌(*Bacillus cereus*) MJ-1 凭借扰乱植物根部和茎部组织的内源性赤霉素帮助红辣椒的生长。

### 2.2.6. 拮抗作用

拮抗微生物能分泌抑制病原菌的活性物质，造成细胞内溶，称为拮抗作用[38]。从植物的根际土壤内分离出对病原微生物有抑制效果的有益菌称为拮抗菌。拮抗菌主要是通过产生抗菌代谢物和酶类发挥作用。章帅文等[39]发现黄麻链霉菌(*Streptomyces corchorusii*) AUH-1 能明显抑制水稻纹枯病菌菌丝生长和菌核萌发。此外，阮宏椿[40]等在红豆杉根际周围分离的曲核链霉菌(*Streptomyces tubercidicus*) ST7-2，能抑制水稻稻曲病菌等多种植物病菌。

### 2.2.7. 竞争作用

PGPR 可以通过位点竞争与营养竞争刺激农作物生长[11]。刘邮洲等[41]发现菌株 B-916 通过形成种群优势，与有害微生物竞争生存空间和营养的方式，抑制病菌繁殖。

### 2.2.8. 诱导抗性

系统抗性(Systemic Resistance)是植物遭到病害时表现出的防御策略，经过特定基因的激活与代谢途径的发生，导致植物体中特定基因表达水平或特定物质的含量发生变化[42]。例如通过使寄主植物细胞壁结构发生变化，建造一道保护细胞壁的屏障来抵御病原菌侵入[43]。在 PGPR 处理菜豆(*Phaseolus vulgaris L.*) 种子后，其根系细胞壁木质化程度显著提高[44]。

## 2.3. 植物根际促生菌的施用方式

PGPR 可直接接种至种子、叶片、幼苗根系或土壤里，它们能够定殖到根际或植物内部，提高植物对有害环境的忍耐能力，凭借充分利用营养、调控植物激素和间接诱导产生系统抗性等途径帮助植物生长[45]。分为种子外包覆法、叶面喷施法、土壤灌施法和土壤(或栽培基质)直接施用法[46]。

## 2.4. 植物根际促生菌的应用

### 2.4.1. 作为微生物菌剂的应用

由菌株通过工业化生产、加工处理制成的活菌制剂称为微生物菌剂[46]。在植物生长过程中，施加多样性的 PGPR 和复合菌剂能提高细菌群落的丰富度，以此影响根际细菌种群的互作[47]。

### 2.4.2. 作为微生物农药的应用

由 PGPR 制成的生物农药可用于保护农作物免受病虫和杂草的入侵[48]。田琳[49]等发现 YC2-17 (*Streptomyces tunisiae*) 可以防治西瓜枯萎病。张芬[50]筛选到的生防细菌苏云金芽孢杆菌(*Bacillus thuringiensis*) 对于水稻白叶枯病苗期的防治效果较高。

### 2.4.3. 土壤养分利用和修复上的应用

土壤全氮、全磷含量是评价土壤肥力高低的关键指标。PGPR 能够提升氮肥的作用效果，促使植物

在低氮含量的土壤里的生长[51]。在土壤氮素循环和土壤磷素循环中，PGPR 能改善植烟土壤养分状况，提升土壤固氮酶活性[52]和土壤磷酸酶活性，明显增加土壤有机碳、全氮、有效磷和速效钾比例，提升土壤肥力[53]。

在存在重金属污染的土壤环境内，PGPR 能提高植物提取重金属的能力，进一步改善被重金属污染的土壤[54]。杜东霞等发现施用菌株 WYN5 能增加黑麦草植株高度，并且能够促进其对重金属镉的富集能力，有助于修复土壤[55]。袁明发现接种 3 种 PGPR 菌剂能提升蜈蚣草修复土壤砷污染的能力，降低土壤中砷占比[56]。联合接种 2~3 种具有互补植物生长促进性状的 PGPR 菌株可提高杂交象草在植物修复中的效率[55]。接种 PGPR 菌剂能分解多种有毒有机物，为解决土壤内有机农药残留的问题提供思路[57]。

### 3. 结论

PGPR 可以凭借固氮、溶磷、解钾等直接作用方式降解植物不能吸收的物质给植物提供必需的营养成分，也能够通过诱导植物产生防御反应、通过和病原菌的竞争和拮抗作用来缓解病原菌的危害促进植物生长。PGPR 在微生物肥料、生物农药和环境修复方面具有一定的应用前景。

### 4. 展望

PGPR 的应用有利于保护环境，缓解化学农药带来的负面问题，既能够保护植物又能够提高土壤肥力，有利于实现增产提质的目标，具有良好的生态效益和良好的发展前景，在农业生产举足轻重。但是发现一些不足，需要完善。要加快挖掘 PGPR 菌株资源，发现一些新的高效的 PGPR 菌株，要进一步丰富和拓展 PGPR 菌株资源库。加强对能够在逆境条件下发挥作用的 PGPR 菌株的筛选，促进植物抵抗逆境(如盐胁迫和干旱条件)的能力，探究 PGPR 菌株的最适发酵条件，提高其作用性能和效率。探究植株 - 微生物 - 土壤互作系统，有助于进一步理解 PGPR 对植物的促生机制，有助于挖掘 PGPR 菌株的生防和促生的机理，研究其发挥作用的机制和通路，为今后开发微生物菌剂、肥料和农药提供一定的理论支撑。将 PGPR 菌株更多的应用于大田实验，研究影响其发挥作用的环境因素，切实提高其实际作用效果。

### 参考文献

- [1] Reza, K., Farzaneh, F., Mehdi, P., et al. (2019) The Effects of Biological, Chemical, and Organic Fertilizers Application on Root Growth Features and Grain Yield of Sorghum. *Journal of Plant Nutrition*, **42**, 2221-2233. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1648667>
- [2] 孟静, 张丽慧, 白变霞, 等. 一株党参根际促生长菌的促生长特性及其挥发性物质对农作物生长的影响[J]. 中国农学通报, 2023, 39(30): 123-131.
- [3] 刘红雨. 一株蜡样芽孢杆菌 DW019 的防病与促生功能研究[D]: [硕士学位论文]. 赣州: 江西理工大学, 2023.
- [4] 肖薇薇. 耐镉镍根际促生菌的筛选及其对镉镍复合胁迫下水稻幼苗生长的影响[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2021.
- [5] 张瑞福. 根际微生物: 农业绿色发展中大有作为的植物第二基因组[J]. 生物技术通报, 2020, 36(9): 1-2.
- [6] Whitman, T., Neurath, R., Perera, A., et al. (2018) Microbial Community Assembly Differs across Minerals in Arhizosphere Microcosm. *Environmental Microbiology*, **20**, 4444-4460.
- [7] Sanjay, P., Jinal, H.N. and Amaresan, N. (2017) Isolation and Characterization of Drought Resistance Bacteria for Plant Growth Promoting Properties and Their Effect on Chilli (*Capsicum annuum*) Seedling under Salt Stress. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, **12**, 85-89. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2017.09.002>
- [8] Etesami, H. and Beattie, G.A. (2018) Mining Halophytes for Plant Growth-Promoting Halotolerant Bacteria to Enhance the Salinity Tolerance of Non-Halophytic Crops. *Frontiers in Microbiology*, **9**, Article No. 148. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00148>
- [9] Tariq, M., Noman, M., Ahmed, T., et al. (2017) Antagonistic Features Displayed by Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR): A Review. *Journal of Plant Science and Phytopathology*, **1**, 38-43. <https://doi.org/10.29328/journal.jpst.1001004>

- [10] 田婧, 李邵, 连青龙, 等. 植物根际促生菌在蔬菜种植中的应用进展[J]. 北方园艺, 2016(6): 181-185.
- [11] 霍佳慧, 毕少杰, 于欣卉, 等. 植物根际促生菌作用机制研究进展[J]. 现代农业科技, 2022(9): 90-96.
- [12] 穆文强, 康慎敏, 李平兰. 根际促生菌对植物的生长促进作用及机制研究进展[J]. 生命科学, 2022, 34(2): 118-127.
- [13] Pii, Y., Mimmo, T., Tomasi, N., et al. (2015) Microbial Interactions in the Rhizosphere: Beneficial Influences of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria on Nutrient Acquisition Process. A Review. *Biology and Fertility of Soils*, **51**, 403-415. <https://doi.org/10.1007/s00374-015-0996-1>
- [14] Mahmud, K., Makaju, S., Ibrahim, R., et al. (2020) Current Progress in Nitrogen Fixing Plants and Microbiome Research. *Plants (Basel)*, **9**, Article No. 97. <https://doi.org/10.3390/plants9010097>
- [15] 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.
- [16] Ledgard, S.F. (1991) Transfer of Fixed Nitrogen from White Clover to Associated Grasses in Swards Grazed by Dairy Cows, Estimated Using <sup>15</sup>N Methods. *Plant and Soil*, **131**, 215-223. <https://doi.org/10.1007/BF00009451>
- [17] 韩梅, 罗培宇, 肖亦农, 等. 玉米内生固氮菌的分离鉴定及其促生长作用研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2010, 41(1): 94-97.
- [18] Alori, E.T., Glick, B.R. and Babalola, O.O. (2017) Microbial Phosphorus Solubilization and Its Potential for Use in Sustainable Agriculture. *Frontiers in Microbiology*, **8**, Article No. 971. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00971>
- [19] Hilda, R. and Reynaldo, F. (1999) Phosphate Solubilizing Bacteria and Their Role in Plant Growth Promotion. *Bio-technology Advances*, **17**, 319-339. [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(99\)00014-2](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(99)00014-2)
- [20] 勾宇春, 王宗抗, 张志鹏, 等. 植物根际促生菌作用机制研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2023, 29(2): 495-506.
- [21] 苏辉兰, 余炳锋, 廖彩凤, 等. 解磷菌对油麦菜的促生作用[J]. 湖南农业科学, 2023(3): 31-35.
- [22] 王君, 范延辉, 尚帅, 等. 一株根际解磷菌的筛选鉴定及溶磷促生作用[J]. 中国土壤与肥料, 2022(6): 195-203.
- [23] 王彦佳, 胡伯昂, 陈佳欣, 等. 2 株紫花苜蓿解钾菌的筛选鉴定及其对产量和品质的影响[J]. 草业学报, 2023, 32(12): 139-149.
- [24] 曹媛媛, 张丽娜, 郭婷婷, 等. 根际解钾菌对烟草生长及钾素吸收的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2019, 46(1): 141-145.
- [25] Carroll, C.S. and Moore, M.M. (2018) Ironing out Siderophore Biosynthesis: A Review of Non-Ribosomal Peptide Synthetase (NRPS)-Independent Siderophore Synthetases. *Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology*, **53**, 356-381. <https://doi.org/10.1080/10409238.2018.1476449>
- [26] 梁建根. 产嗜铁素菌株 HZ-2 的鉴定及其产嗜铁素能力的检测[J]. 浙江农业科学, 2021, 62(9): 1849-1852+1881.
- [27] 武雯雯, 薛林贵, 张璐, 等. 一株产嗜铁素耐镉菌的分离及其对黑麦草种子萌发的作用[J]. 微生物学通报, 2021, 48(6): 1895-1906.
- [28] Rubio, V., Bustos, R., Irigoyen, M.L., et al. (2009) Plant Hormones and Nutrient Signaling. *Plant Molecular Biology*, **69**, 361-373. <https://doi.org/10.1007/s11103-008-9380-y>
- [29] 李玲, 黄光文, 何福林, 等. 外源激素在野葛快速繁殖中的应用与进展[J]. 湘南学院学报, 2015, 36(5): 28-30.
- [30] 欧阳波, 李汉霞, 叶志彪. 玉米素和 IAA 对番茄子叶再生的影响[J]. 植物生理学通讯, 2003(3): 217-218.
- [31] 陆娟, 苏利梅, 胡名扬, 等. 芝麻根际生长素产生菌 SA4 的分离与鉴定[J]. 阜阳师范学院学报(自然科学版), 2015, 32(2): 79-82.
- [32] 朱诗苗. IAA 促生菌的分离鉴定及对烟草种子萌发与烟苗生长发育的影响[D]: [硕士学位论文]. 延吉: 延边大学, 2020.
- [33] 李江, 靳艳玲, 赵海. 根际促生菌对植物生长的影响及其作用机制[J]. 黑龙江农业科学, 2023(10): 132-137.
- [34] 邵兰军, 刘凯, 李宙文, 等. 烟草叶际细胞分裂素产生菌 Y-P22 的筛选、鉴定及其应用效果[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2015, 46(2): 194-197.
- [35] Kang, S.M., Joo, G.J., Hamayun, M., et al. (2009) Gibberellin Production and Phosphate Solubilization by Newly Isolated Strain of *Acinetobacter calcoaceticus* and Its Effect on Plant Growth. *Biotechnology Letters*, **31**, 277-281. <https://doi.org/10.1007/s10529-008-9867-2>
- [36] 吴秉奇, 梁永江, 丁延芹, 等. 两株烟草根际拮抗菌的生防和促生效果研究[J]. 中国烟草科学, 2013, 34(1): 66-71.

- [37] Joo, G.J., Kim, Y.M., Kim, J.T., et al. (2005) Gibberellins-Producing Rhizobacteria Increase Endogenous Gibberellins Content and Promote Growth of Red Peppers. *Journal of Microbiology*, **43**, 510-515.
- [38] Ashour, A. and Afify, A. (2017) Antagonistic Effect of Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) as Biocontrol of Plants Damping-Off. *Journal of Agricultural Chemistry and Biotechnology*, **8**, 119-122. <https://doi.org/10.21608/jacb.2017.38481>
- [39] 章帅文, 刘群, 杨勇, 等. 黄麻链霉菌 AUH-1 拮抗水稻纹枯病菌的作用机制研究[J]. 江西农业大学学报, 2019, 41(6): 1048-1053.
- [40] 阮宏椿, 石妞姐, 杜宜新, 等. 水稻稻瘟病拮抗稀有放线菌的筛选及防治效果[J]. 中国生物防治学报, 2021, 37(3): 538-546.
- [41] 刘邮洲, 陈志谊, 刘永锋, 等. 拮抗细菌 B-916 对水稻病原菌的抑制效果及其定殖动态研究[J]. 江苏农业科学, 2005(6): 48-49+72.
- [42] Rashid, M. and Chung, Y.R. (2017) Induction of Systemic Resistance against Insect Herbivores in Plants by Beneficial Soil Microbes. *Frontiers in Plant Science*, **8**, Article No. 1816. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01816>
- [43] Benhamou, N. (1996) Induction of Differential Host Responses by *Pseudomonas fluorescens* in Ri T-DNA Transformed Pea Roots after Challenge with *Fusarium oxysporum* f.sp. *pisi* and *Pythium ultimum*. *Phytopathology*, **86**, 114-178. <https://doi.org/10.1094/Phyto-86-1174>
- [44] Anderson, A.J. (1985) Responses of Bean to Root Colonization with *Pseudomonas putida* in a Hydroponic System. *Phytopathology*, **75**, 992-995. <https://doi.org/10.1094/Phyto-75-992>
- [45] Lopes, M., Dias-Filho, M. and Gurgel, E. (2021) Successful Plant Growth-Promoting Microbes: Inoculation Methods and Abiotic Factors. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, **5**, Article ID: 606454. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.606454>
- [46] 马莹, 曹梦圆, 石孝均, 等. 植物促生菌的功能及在可持续农业中的应用[J]. 土壤学报, 2022: 1-15.
- [47] Li, J.T., Yang, H., Chen, Y., et al. (2022) Development and Preliminary Application of Compound Bacterial Agent for Degrading Carbendazim and Acetamiprid Residues. *Soils*, **54**, 646-652.
- [48] Báez-Vallejo, N., Camarena-Pozos, D.A., Monribot-Villanueva, J.L., et al. (2020) Forest Tree Associated Bacteria for Potential Biological Control of *Fusarium solani* and of *Fusarium kuroshium*, Causal Agent of Fusarium Dieback. *Microbiological Research*, **235**, Article ID: 126440. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126440>
- [49] 田琳, 陈婧, 王阳. 西瓜枯萎病生防链霉菌的筛选及其防治机理研究[J]. 中国生物防治学报, 2023, 39(3): 657-666.
- [50] 张芬. 水稻稻瘟病和白叶枯病拮抗细菌的筛选及防治作用研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- [51] 薄永琳, 葛淼淼, 侯冰, 等. 根际促生菌对植物生长的调控作用研究进展[J]. 环境保护与循环经济, 2022, 42(10): 66-71.
- [52] 赵玲玉, 索升州, 赵祺, 等. 梭梭根际促生菌(PGPR)菌肥对番茄产量、品质和土壤特性的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2022, 57(3): 42-51, 57.
- [53] 杜东霞, 李咏梅, 喻孟元, 等. 耐镉根际促生菌 WYN5 的分子鉴定及其对黑麦草富集镉的影响[J]. 中国农学通报, 2023, 39(27): 59-66.
- [54] 袁明. PGPR 菌剂在蜈蚣草修复砷污染土壤中的应用研究[J]. 种子科技, 2021(23): 22-25.
- [55] 苗益博, 杨傲, 邢成广, 等. 联合接种植物生长益生菌提高杂交象草在铜污染土壤修复中的效率[J]. 中山大学学报(自然科学版)(中英文), 2022, 61(5): 50-61.
- [56] 徐丽娟, 张金政, 袁玉清, 等. AMF 和 PGPR 修复甲胺磷污染土壤的效果[J]. 土壤学报, 2016, 53(4): 919-929.
- [57] 接伟光, 姚延轩, 张颖智, 等. 根际促生微生物对作物农残影响的研究进展[J]. 生物技术, 2019, 29(4): 398-403+397.