

摆竹根际可培养细菌的分离评价及合成群落促生

杨芾¹, 岳晋军², 袁金玲², 孙启武¹, 刘蕾^{1*}

- 1 中国林业科学研究院林业研究所, 林木资源高效生产全国重点实验室, 国家林业和草原局林木培育重点实验室, 北京
- 2 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 杭州

杨芾, 岳晋军, 袁金玲, 孙启武, 刘蕾. 摆竹根际可培养细菌的分离评价及合成群落促生[J]. 微生物学报, 2025, 65(4): 1558-1570.
YANG Fu, YUE Jinjun, YUAN Jinling, SUN Qiwu, LIU Lie. Cultivable bacteria from the rhizosphere of *Indosasa acutiligulata*: isolation, evaluation, and SynComs for promoting plant growth[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2025, 65(4): 1558-1570.

摘要:【目的】植物根际富集有大量微生物, 植物根系-根际微生物之间的相互作用显著影响了植物的生长和健康。摆竹(*Indosasa acutiligulata*)是重要的经济竹种。挖掘摆竹根际土壤功能细菌, 明确合成群落对竹类植物生长的影响, 旨在为竹类植物功能菌株资源的开发利用提供新的途径和思路, 对精准提升森林质量、保障森林“四库”功能具有重要理论意义和实践价值。【方法】以湖南省九嶷山国家级自然保护区的摆竹根际土壤为研究对象, 采用稀释培养法分离细菌, 利用最大似然法基于 16S rRNA 基因序列构建系统发育树; 依托功能筛选平板和特异性颜色变化进行功能评价, 筛选出效果良好且相互不拮抗的菌株进行复合, 最后通过回接试验检测合成群落对毛竹(*Phyllostachys edulis*)幼苗生长的影响。【结果】共分离获得 70 株根际细菌, 隶属于 4 门 21 科 35 属; 假单胞菌门(*Pseudomonadota*)为优势门, 伯克霍尔德氏菌科(*Burkholderiaceae*)为优势菌科。对这 70 株细菌进行功能评价发现, 30 株具有产吲哚乙酸(indole-3-acetic acid, IAA)功能, 16 株具有产铁载体功能。在兼具 2 种功能的细菌中, 可溶解无机磷和矿化有机磷的菌株各有 4 株, 另有 3 株具有解钾功能。菌株 TR5、TN6、TN26 不仅兼具产 IAA 和产铁载体的能力, 还具备无机磷溶解和有机磷矿化的能力。基于生理生化指标测定及 16S rRNA 基因序列比对, 结果表明它们分别为吡咯素伯克霍尔德氏菌(*Burkholderia pyrrocinia*)、沼泽伯克霍尔德氏菌(*Burkholderia paludis*)和克斯腾伯斯副伯克霍尔德氏菌(*Paraburkholderia kirstenboschensis*)。通过回接试验发现, 由菌株 TR5、TN6、TN26 复合形成的菌液 FH 能够显著促进毛竹幼苗根和叶片的伸长, 以及毛竹幼苗竹鞭的生长。【结论】摆竹根际土壤中功能细菌资源丰富, 本研究筛选获得了多株具有产 IAA、产铁载体、溶磷和解钾功能的菌株, 且回接试验表明, 合成群落 FH 对毛竹幼苗生长具有显著的促进作用。

关键词: 摆竹; 合成群落; 分离培养; 伯克霍尔德氏菌科; 功能评价

资助项目: 中国林业科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(CAFBB2022XE001)

This work was supported by the Fundamental Research Fund for the Central Non-profit Research Institution of Chinese Academy of Forestry (CAFBB2022XE001).

*Corresponding author. Tel: +86-10-62888687, E-mail: liulei519@caf.ac.cn

Received: 2024-09-09; Accepted: 2024-10-18; Published online: 2024-12-16

Cultivable bacteria from the rhizosphere of *Indosasa acutiligulata*: isolation, evaluation, and SynComs for promoting plant growth

YANG Fu¹, YUE Jinjun², YUAN Jinling², SUN Qiwu¹, LIU Lie^{1*}

1 State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of National Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing, China

2 Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou, Zhejiang, China

Abstract: [Objective] The rhizosphere of plants hosts a diverse array of microorganisms that play a crucial role in plant growth and health. This study identified functional bacteria in the rhizosphere soil of an economic bamboo species *Indosasa acutiligulata* and assessed the effects of synthetic microbial communities (SynComs) on bamboo growth. The results are expected to provide implications for enhancing forest quality and utilizing beneficial microorganisms in bamboo cultivation. [Methods] Rhizosphere soil samples of *In. acutiligulata* were collected from the Jiuyi Mountain National Nature Reserve. Bacteria were isolated by the dilution culture method, and a phylogenetic tree was established by the maximum-likelihood algorithm based on 16S rRNA gene sequences. Specific media and colorimetric assays were employed to study the functions of strains. The strains with plant growth-promoting effects and no antagonistic effects between each other were combined. The effects of SynComs on the growth of *Phyllostachys edulis* seedlings were examined by re-inoculation experiments. [Results] Seventy strains of rhizosphere bacteria were isolated, representing 35 genera belonging to 21 families of four phyla. The dominant phylum was *Pseudomonadota* and the predominant family was *Burkholderiaceae*. Functional analyses revealed that 30 strains produced indole-3-acetic acid (IAA), while 16 strains produced siderophores. Among those with dual functions, there were four strains capable of solubilizing inorganic phosphorus, four strains capable of mineralizing organic phosphorus, and three strains capable of solubilizing potassium. Strains TR5, TN6, and TN26 exhibited capabilities to produce IAA and siderophores, as well as solubilize inorganic phosphorus and mineralize organic phosphorus. They were identified as *Burkholderia pyrrocinia*, *Burkholderia paludis*, and *Paraburkholderia kirstenboschensis*, respectively, based on physiological and biochemical properties and 16S rRNA gene sequences alignments. Re-inoculation experiments demonstrated that the SynCom FH, comprising strains TR5, TN6, and TN26, significantly enhanced the root, leaf, and rhizoma growth of *Ph. edulis* seedlings. [Conclusion] The rhizosphere of *In. acutiligulata* harbors diverse functional microorganisms capable of producing IAA and siderophores, solubilizing phosphorus, and releasing potassium. The re-inoculation experiments confirmed that the SynCom FH promotes the growth of *Ph. edulis* seedlings.

Keywords: *Indosasa acutiligulata*; synthetic microbial communities (SynComs); isolation and culture; *Burkholderiaceae*; functional assessment

摆竹(*Indosasa acutiligulata*), 隶属于禾本科(Gramineae)大节竹属(*Indosasa*)。摆竹整竿适宜作为木材应用, 且竹笋鲜美可食, 是湖南南部和广西北部等地的主要经济竹种^[1]。摆竹盘根错节的地下茎具有出色的地表截流、涵养水源、防止水土流失的功能。我国湖南省永州市宁远县九嶷山国家级自然保护区核心区内保护的九嶷山“斑竹”, 经鉴定实为摆竹, 这些“长斑”的竹秆疑似由真菌感染所致; 由于斑点美观, 常被用来制作乐器、家具等, 极具收藏、观赏、经济和科研价值^[1]。

在植物的整个生长周期中, 土壤、植物和微生物之间存在着紧密的联系^[2]。植物根际富集了大量各式各样的微生物, 这些微生物统称为根际微生物组。根际微生物组是植物功能发挥不可或缺的重要组成部分, 其中包含能显著促进植物生长发育、提高对矿物质营养的吸收利用能力, 并增强植物环境适应性的功能细菌^[3]。这些功能细菌种类繁多, 功能多样, 例如分泌植物生长激素、溶磷、固氮、拮抗病原菌等^[4-5]。充分挖掘并利用这些功能细菌资源, 探索功能细菌与植物的互作关系, 对于竹林土壤健康管理, 实现竹林高效、绿色、可持续经营具有重要意义。

合成群落(synthetic microbial communities, SynComs)是近年来兴起的研究方向, 主要基于合成生物学和微生物生态学理论, 人为地将2种或多种具有不同分类和遗传特征或功能特性的微生物进行组合^[6]。研究表明, 相较于单一菌株, 合成群落具有保留群落优势、功能更丰富促生效果更高效稳定的特点^[7], 在提升植物健康方面展现出巨大潜力^[8]。

目前, 众多研究学者已对竹类植物的根际微生物组开展了大量研究, 解析了毛竹、撑篙竹(*Bambusa pervariabilis*)以及桂竹(*Phyllostachys*

bambusoides)等竹种根际细菌群落结构和功能^[9-11], 同时从竹类植物根际土壤中挖掘出了一批具有潜在产吲哚乙酸(indole-3-acetic acid, IAA)、铁载体、溶磷、固氮以及解钾等功能的菌株, 并通过回接试验明确了这些功能细菌不仅能够促进毛竹幼苗根和叶片的生长, 同时对毛竹细胞的代谢活性有增强作用^[12-13]。然而, 对于摆竹这一重要竹种来说, 其根际微生物的相关研究尚未见报道; 并且, 目前对于挖掘获得的竹类植物功能细菌的研究也仅限于单一菌株, 关于合成群落对竹类植物生长影响的研究相对较少。

鉴于此, 本研究以湖南省永州市宁远县九嶷山国家级自然保护区摆竹根际土壤为研究对象, 采用培养组学的方法进行菌株的分离和鉴定, 并筛选具有潜在植物促生功能的菌株; 进一步基于功能评价结果以及功能互补原则构建合成群落, 通过回接试验考察合成群落对竹类植物生长的影响, 旨在为竹类植物功能菌株资源的开发利用提供新的途径和思路, 同时也对精准提升森林质量、保障森林“四库”功能提供理论意义和实践价值。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 植物材料

细菌分离试验所用土壤样品为摆竹(*Indosasa acutiligulata*)根际土壤, 采集自我国湖南省永州市宁远县九嶷山国家级自然保护区(海拔1 210 m, 25°23'49"N, 111°58'48"E)。供试验的幼苗为毛竹(*Ph. edulis*)实生苗, 种子采集自广西壮族自治区桂林市灵川县(110°07'–110°47'E, 25°04'–25°48'N), 由广西林业科学研究院提供。

1.1.2 主要试剂

螯合树脂 Chelex-100、三羟甲基氨基甲烷

(Tris)、乙二胺四乙酸 (ethylene diamine tetraacetic acid, EDTA)、聚乙二醇辛基苯基醚 (TritonX-100)、75% 乙醇、次氯酸钠、丙三醇、Salkowski 比色液和铬天青 S 定性定量所需试剂均为国产分析纯; *Taq* PCR Master Mix 购自 BoMED 公司; 细菌基因组 DNA 提取试剂盒(离心柱型)购自 Tiangen 公司; 细菌革兰氏染色试剂盒购自 Solarbio 公司; API ZYM、API 20NE 和 API 50CH 试纸盒购自 BioMérieux 公司。

1.1.3 培养基

R₂A 培养基、NA 培养基、无机磷筛选培养基、有机磷筛选培养基均购自 Hopebio 公司。铬天青 S 定性培养基按照荣良燕等^[14]的方法配制, 解钾培养基按照 Rajawat 等^[15]的方法配制。

1.2 摆竹根际土壤可培养细菌的分离与纯化

取 1.0 g 五点混样法获得的根际土壤, 通过超声波分散土壤团聚体, 悬浮于 9 mL 无菌水中制成土壤匀浆。将样品匀浆用无菌水进行 10 倍梯度稀释至 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} 、 10^{-6} 。吸取 200 μ L 稀释液均匀涂布于 NA 和 R₂A 培养基上, 封口膜封好后, 于 28 $^{\circ}$ C 避光倒置培养 3–5 d。根据菌落形态特征挑取平板上的不同单菌落, 在相应培养基上进行 2–3 次划线纯化培养。挑取纯化的菌体于含有 20% 甘油的液体培养基冻存管中, -80° C 冰箱保藏, 每隔半年活化转存 1 次。

1.3 摆竹根际土壤可培养细菌的分子鉴定

参照试剂盒说明书提取细菌 DNA, 并通过 NanoDrop (ThermoFisher Scientific 公司) 和琼脂糖凝胶电泳检测 DNA 的质量和浓度, 检测合格的 DNA 作为模板进行 16S rRNA 基因序列的 PCR 扩增。细菌 16S rRNA 基因序列扩增采用通用引物 27F 和 1492R^[16], 反应体系参考文献^[12]。PCR 产物经检测后送至宝锐通生物科技(北京)有

限公司进行测序。将 16S rRNA 基因序列通过 EzBioCloud (<https://www.ezbiocloud.net/>) 在线比对。利用 MEGA X^[17] 软件对菌株分类地位进行分析; 首先将菌株的 16S rRNA 基因序列通过 MUSCLE^[18] 对齐, 随后采用最大似然法 (maximum likelihood method, ML) 构建系统发育树, 自举值为 1 000。

1.4 菌株功能评价试验

菌株的功能评价参照前期研究方法进行^[12]; 通过 Salkowski 反应^[19]检测菌株产 IAA 的能力; 利用铬天青 S 培养基对菌株产铁载体的能力进行定性检测, 并通过混合铬天青 S 检测液后绘制标准曲线的方法进行定量测定^[20]; 通过观察平板培养基上的特异性晕圈/显色, 计算晕圈直径与菌落直径的比值, 评价菌株溶磷和解钾的能力^[15,21]。

1.5 功能菌株的表型鉴定

对筛选获得的多功能且具有应用潜力的菌株进行菌落和菌株形态学观察。参考文献^[22]对细菌进行运动性、过氧化氢酶、氧化酶活性检测试验。依据生产商提供的说明书进行革兰氏染色、API ZYM、API 20NE 和 API 50CH 试纸条的检测。

1.6 平板对峙试验

将供试菌株挑入相应液体培养基中制备成 OD_{600} 为 1.0 的悬浊液; 分次吸取 5 μ L 菌液, 点接于固体培养基上, 使待测菌株对应形成“V”字形两边; 通过观察菌落形态, 明确菌株间是否存在拮抗作用。

1.7 毛竹幼苗接种试验

挑取 TR5、TN6、TN26 单菌落于相应液体培养基中, 置于摇床 30 $^{\circ}$ C、150 r/min 培养 2–3 d; 4 $^{\circ}$ C、8 000 r/min 离心 10 min 收集菌体, 使用无菌水对收集的菌体重悬, 并调整 OD_{600} 为 0.5; 将使用无菌水重悬后的 3 株菌液等比例

混合构建合成群落 FH。挑选长势相近的毛竹幼苗 60 盆, 对接种前的毛竹幼苗进行株高和叶长的测定。处理组(FH)将配制好的菌液均匀地浇灌到幼苗根系附近, 每盆浇灌约 50 mL; 对照组(CK)浇灌无菌水 50 mL, 每组 30 盆处理。每隔 3 d 补充 1 次水分, 置于中国林业科学研究院温室培养[培养条件: 30 °C (光)/25 °C (暗), 湿度为 65%]。处理 60 d 时, 随机选取每个处理 15 株幼苗测量株高和叶长, 并观察毛竹幼苗的竹鞭生长情况, 以此考察合成群落 FH 的促生功能。

1.8 数据处理

使用 R Studio 和 GraphPad Prism 8 进行数据处理和图表绘制^[23], IBM SPSS Statistics 26^[24]进行方差分析和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 摆竹根际土壤可培养细菌的分离鉴定与系统发育树的构建

本研究从摆竹根际土壤中共分离得到 70 株细菌。基于 16S rRNA 基因序列构建的系统发育树, 菌株间的系统发育关系如图 1 所示。结果显示, 所分离得到的 70 株细菌隶属于 4 门 21 科 35 属。其中, 假单胞菌门(*Pseudomonadota*)菌株数量最多, 为 35 株; 其次为芽孢杆菌门(*Bacillota*), 有 18 株; 再次为放线菌门(*Actinomycetota*)有 14 株; 拟杆菌门(*Bacteroidota*)最少, 仅有 3 株。在科水平上, 伯克霍尔德氏菌科(*Burkholderiaceae*)中的副伯克霍尔德氏菌属(*Paraburkholderia*)与伯克霍尔德氏菌属(*Burkholderia*)、卡瓦列罗菌属(*Caballeronia*)亲缘关系较近, 且分离数量最多, 共 15 株, 占比 21.43%; 其次为芽孢杆菌科(*Bacillaceae*)和类芽孢杆菌科(*Paenibacillaceae*), 占比分别为 10.00% 和 8.57%。在属水平上, 优势属为副伯克霍尔德

氏菌属(*Paraburkholderia*), 共分离出 10 株, 占比 14.29%; 其次为芽孢杆菌属(*Bacillus*)和类芽孢杆菌属(*Paenibacillus*), 占比分别为 8.57% 和 7.14% (图 1)。

2.2 摆竹根际土壤可培养功能细菌的筛选

对所分离出的 70 株摆竹根际土壤可培养细菌进行产 IAA 和产铁载体功能的初步筛选, 结果如图 1 所示。本研究共筛选出 37 株功能细菌, 其中 30 株具有产 IAA 的能力。威海鲜球菌(*Jeotgalicoccus* sp.) 3BKWN 的产 IAA 能力最强, 达到 (509.46 ± 5.56) mg/L, 其次为微杆菌(*Microbacterium* sp.) TN22 和考克氏菌(*Kocuria* sp.) 2BKWN, 产 IAA 的量分别为 (352.00 ± 1.56) mg/L 和 (200.78 ± 6.21) mg/L。16 株细菌具有产铁载体的能力, 其中副伯克霍尔德氏菌(*Paraburkholderia* sp.) TN5 的产铁载体能力最强, 能力值为 0.23 ± 0.05 ; 其次是伯克霍尔德氏菌(*Burkholderia* sp.) TN6 和类芽孢杆菌(*Paenibacillus* sp.) TN35, 产铁载体的能力值分别为 0.32 ± 0.02 和 0.34 ± 0.01 。值得注意的是, 有 10 株细菌同时具备这 2 种功能, 它们分别是伯克霍尔德氏菌科的 TR5、TR8、TN5、TN6 和 TN26, 芽孢杆菌科的 2MLWN 和 3BKWN, 罗河杆菌科(*Rhodanobacteraceae*)的 TR4 和 TR9, 以及链霉菌科(*Streptomycetaceae*)的 TN7。

进一步对产 IAA、铁载体能力较强以及兼具 2 种功能的菌株进行功能挖掘, 利用平板检测法对菌株的溶磷和解钾功能进行定性检测, 结果如表 1 所示。伯克霍尔德氏菌科的 TR5、TN6、TN26 同时具有无机磷溶解和有机磷矿化的能力; 菌株 *Paenibacillus* sp. TN35 兼具有机磷矿化和解钾能力; 菌株 *Paraburkholderia* sp. TN5 和 *Kitasatospora* sp. TN7 仅具有解钾的能力; 菌株 *Bacillus* sp. 2MLWN 仅具有溶解无机

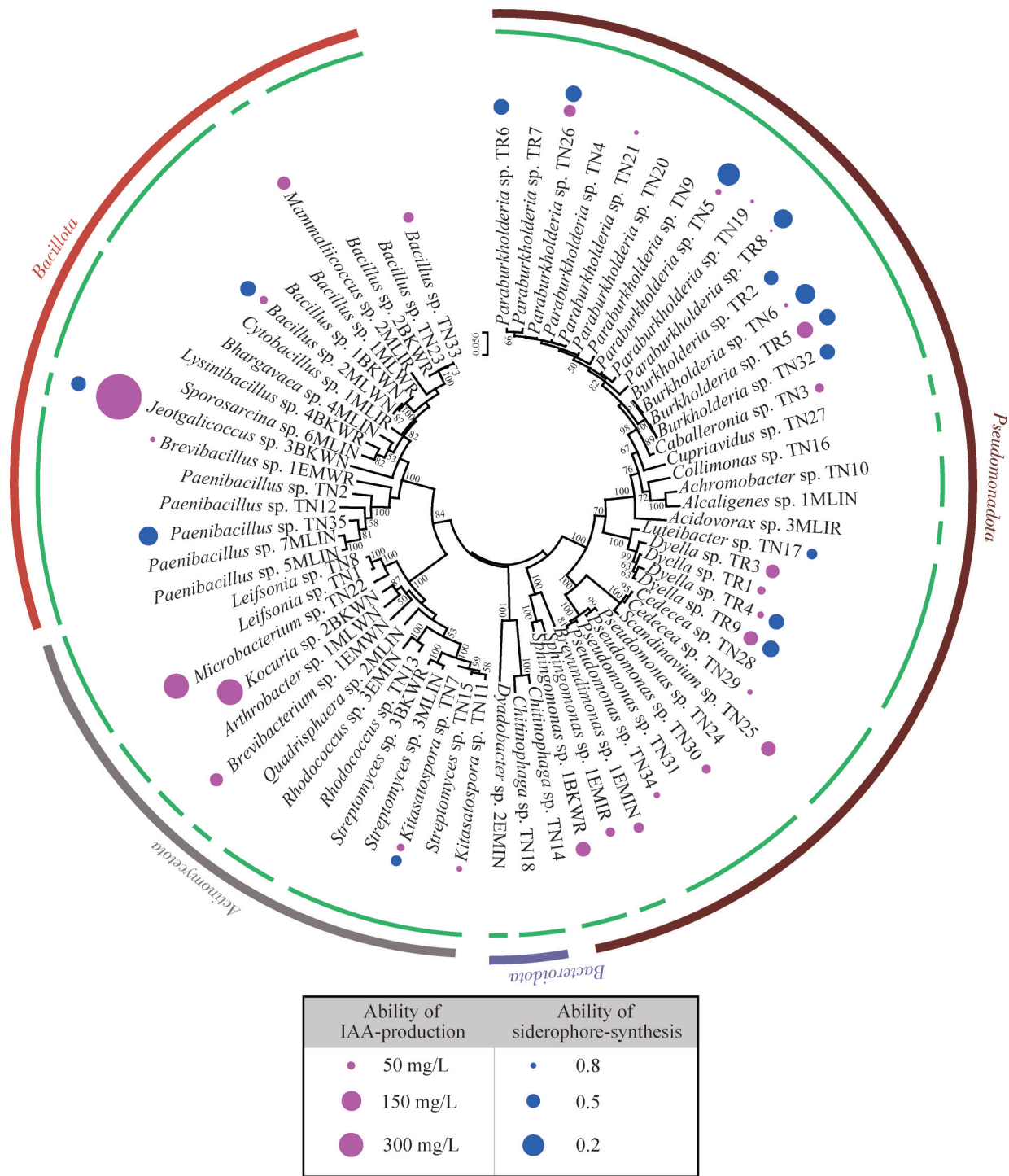


图1 摆竹根际土壤可培养细菌系统发育树及产IAA、产铁载体功能评价。图中最外圈代表不同门水平菌株数量，内圈代表不同科水平数量。

Figure 1 Phylogenetic tree of cultivable rhizosphere soil bacteria of *Indosasa acutiligulata* and functional evaluation of IAA-production and siderophore-synthesis. The outermost circle represents the number of strains at the phylum level, and the inner circle represents the number of strains at the family level.

磷的能力。

2.3 功能菌株的表型鉴定

功能评价结果表明, 菌株 TR5、TN6 和 TN26 不仅具备产 IAA 和铁载体的能力, 同时还具有无机磷溶解和有机磷矿化的功能。通过 16S rRNA 基因序列比对发现, 这 3 株功能细菌均隶属于伯克霍尔德氏菌科。因此, 本研究对 3 株细菌进行了表型及生理生化特征的鉴定, 为进一步构建合成群落以及回接植物材料考察其促生功能提供数据支持。

菌株 TR5、TN6 和 TN26 的菌落形态描述、生长最适温度、pH 和 NaCl 浓度等信息见表 2。经染色后, 显微镜下观察到 TR5、TN6 和 TN26 菌体均呈红色, 表明 3 株菌均为革兰氏阴性菌。在半固体培养基上, 3 个菌株均呈现云雾状生长, 表明它们具有运动性。与 3% H₂O₂ 接触时产生气泡, 且与 1% 盐酸二甲基对苯二胺接触后

变红, 表明它们的氧化酶和过氧化氢酶反应呈阳性。试纸条检测结果表明, 菌株 TR5 能够还原硝酸盐, 菌株 TN6 能够发酵葡萄糖和水解七叶灵, 但菌株 TN26 在这 2 项检测中均为阴性。此外菌株 TR5、TN6 和 TN26 的底物同化差异结果见表 2。

研究结果表明, 菌株 TR5、TN6 和 TN26 分别与模式菌株吡咯素伯克霍尔德氏菌 (*B. pyrrocinia*) LMG 14191^T、沼泽伯克霍尔德氏菌 (*B. paludis*) MSh1^T 和克斯腾伯斯副伯克霍尔德氏菌 (*P. kirstenboschensis*) Kb15^T 的生理生化结果相一致^[25-27]。结合生物学特征、生理生化指标和 16S rRNA 基因序列比对结果, 可以确定菌株 TR5、TN6 和 TN26 分别为吡咯素伯克霍尔德氏菌、沼泽伯克霍尔德氏菌和克斯腾伯斯副伯克霍尔德氏菌。

表1 摆竹根际土壤可培养细菌溶磷和解钾能力评价

Table 1 Evaluation of phosphorus-solubilizing and potassium-dissolving abilities of cultivable bacteria in the rhizosphere soil of *Indosasa acutiligulata*

样品编号 Sample	相似菌株 Top-hit taxon	相似性 Similarity (%)	无机磷溶解能力 Inorganic phosphorus solubility	有机磷矿化能力 Organic phosphate solubility	解钾能力 Potassium-dissolving ability
TR4	<i>Dyella terrae</i>	99.15	—	—	—
TR5	<i>Burkholderia pyrrocinia</i>	99.87	1.90±0.15	2.67±0.42	—
TR8	<i>Paraburkholderia acidiphila</i>	98.85	—	—	—
TR9	<i>Dyella amyloliquefaciens</i>	99.29	—	—	—
TN5	<i>Paraburkholderia azotifigens</i>	98.94	—	—	+
TN6	<i>Burkholderia paludis</i>	99.78	1.25±0.22	2.33±0.17	—
TN7	<i>Kitasatospora kifunensis</i>	99.78	—	—	+
TN22	<i>Microbacterium dextranolyticum</i>	99.61	—	—	—
TN26	<i>Paraburkholderia kirstenboschensis</i>	98.94	1.70±0.29	3.23±0.24	—
TN35	<i>Paenibacillus uliginis</i>	99.58	—	1.70±0.21	+
2MLWN	<i>Bacillus siamensis</i>	99.93	1.27±0.16	—	—
2BKWN	<i>Kocuria oceani</i>	99.68	—	—	—
3BKWN	<i>Jeotgalicoccus marinus</i>	99.93	—	—	—

+: 该菌株解钾能力为阳性; —: 该菌株未检测出相应功能。

+: The strain had a positive ability of potassium-dissolving; —: The function was not detected in the strain.

表2 菌株TR5、TN6、TN26的表型特征差异

Table 2 Differences in phenotypic characteristics of strains TR5, TN6, and TN26

Characteristic	TR5	TN6	TN26
Phenotype			
Colony color	Yellow	Yellow white	Yellow white
Colony morphology	Round, smooth	Round, smooth	Round, smooth
Cell length	1.0–2.0 μm	1.6–2.1 μm	2.1–2.5 μm
Cell width	0.6–0.9 μm	0.6–0.8 μm	0.6–0.8 μm
Gram staining	–	–	–
Optimal temperature ($^{\circ}\text{C}$)	28	28	28
Optimal NaCl (%)	0.0	0.0	0.5
Optimal pH	7.0	7.0	7.0
Enzymatic activity			
Esculin hydrolysis	–	+	–
Glucosylation	–	+	–
Nitrate reduction	+	–	–
Assimilation			
2-keto-gluconate	+	–	–
5-keto-gluconate	+	–	–
Amygdalin	+	–	–
Arabinose	+	–	+
D-gentiobiose	+	–	–
D-lactose	–	+	–
D-maltose	–	+	–
Erythritol	–	+	–
L-rhamnose	–	–	+
Mannitol	+	–	+
Mannose	+	–	+
N-acetylglucosamine	+	–	+
Xylitol	+	–	–

+: 反应结果为阳性; –: 反应结果为阴性。

+: Positive reaction result; –: Negative reaction result.

2.4 平板对峙试验

菌株 TR5、TN6、TN26 的平板拮抗试验结果如图 2 所示。结果显示, 随着点接距离的增大, 同一菌株的菌落形态保持一致, 并未受到不同菌株间距离变化的影响。因此, 可以判断这 3 株细菌之间不存在拮抗作用, 适合组合成群落进行后续研究。

2.5 合成群落的促生作用

将菌株 TR5、TN6、TN26 的菌悬液按等比

例混合后, 构建了合成群落 FH, 并通过回接试验考察了合成群落 FH 对毛竹幼苗生长的影响。总体来看, 接种合成群落 60 d 后的毛竹幼苗株高更高, 根系更发达。通过测量发现, 接种合成群落的毛竹幼苗叶片长度为 (11.70 ± 0.98) cm, 与接种前相比增长了 65.96%; 株高为 (47.90 ± 5.02) cm, 增长了 119.70%, 而对照组 CK 仅增长了 19.35% 和 14.47%。统计结果表明, FH 处理组的毛竹幼苗株高和叶片长度均显著高

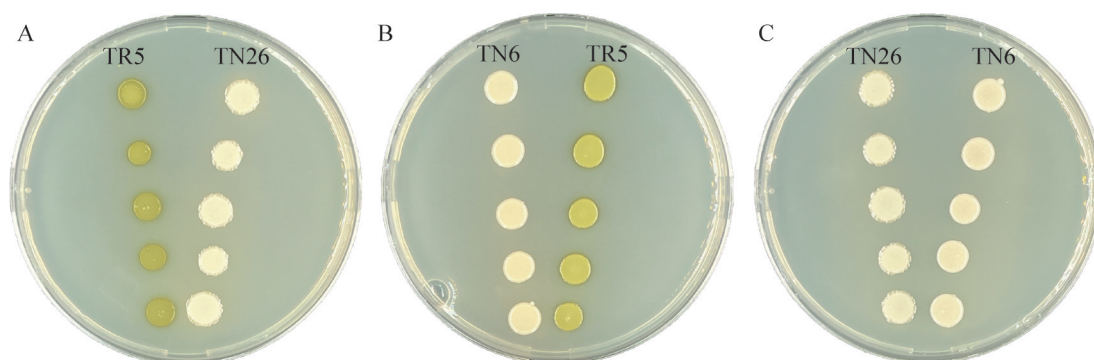


图2 菌株TR5、TN6、TN26的平板拮抗试验。A: 菌株TR5和TN26; B: 菌株TN6和菌株TR5; C: 菌株TN26和菌株TN6。

Figure 2 Antagonism test of strains TR5, TN6, and TN26 on the medium. A: Strains TR5 and TN26. B: Strains TN6 and TR5. C: Strains TN26 and TN6.

于对照组 CK ($P<0.05$), 且株高增长量呈极显著差异($P<0.01$) (图 3)。上述研究结果表明, 合成群落 FH 对毛竹幼苗的生长具有显著的促进作用。

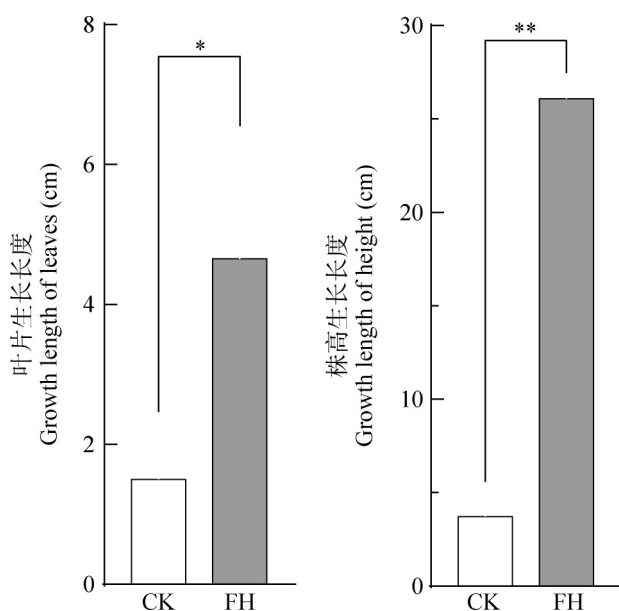


图3 接种合成群落FH 60 d后毛竹幼苗的生长情况。*: 差异显著 ($P<0.05$); **: 差异极显著 ($P<0.01$)。

Figure 3 Growth 60 days condition of *Phyllostachys edulis* seedlings after inoculation with SynComs FH. *: Significant difference ($P<0.05$); **: Highly significant difference ($P<0.01$).

进一步观察发现, 施加合成群落 FH 的处理组中, 30 盆幼苗中有 12 盆出现了竹鞭 (图 4), 占总数的 40%, 竹鞭的平均长度为 (11.89 ± 4.10) cm; 而 CK 对照组的 30 盆幼苗中, 并未发现竹鞭。据此推测合成群落 FH 的处理能够促进毛竹发鞭。竹鞭在竹类植物的生长和繁殖过程中扮演着重要的角色, 具有吸收、输导和分生繁衍地下鞭根与地上竹竿的多重功能^[28]。本研究中, 合成群落可能可促进毛竹竹鞭的生长, 进而可能提升毛竹养分和水分的运输效率, 但其促进发鞭的具体机制有待于深入研究。

3 讨论与结论

据国家林业局统计, 我国竹产业产值已接近 3 200 亿元, 并且计划到 2025 年使竹产业产值超过 7 000 亿元。特别是 2023 年提出的“以竹代塑”倡议, 为竹产业发展新局面提供了方向和路径。因此, 推动竹资源“量”和“质”的提升, 实现竹产业提质增效, 已成为当前竹产业发展的核心目标。2021 年, 申建波等^[3]提出了“根际生命共同体理论”, 认为根际是植物-微生物、微生物-微生物互作最活跃的热点区域, 能够成倍提升植物对土壤养分的活化与



图4 接种合成群落FH 60 d后毛竹幼苗的发鞭情况。图中红色箭头所指为毛竹盆栽幼苗的竹鞭。

Figure 4 The rhizome 60 days growth condition of *Phyllostachys edulis* seedlings after inoculation with SynComs FH. The red arrows pointed to the rhizome of the *Phyllostachys edulis* seedlings.

利用效率。因此,以根际互作为支点,充分挖掘功能微生物资源,对于提升植物-土壤系统养分利用效率、实现竹产业高质量发展具有重要意义。

近年来,许多专家学者对毛竹^[12,29-30]、雷竹^[31]、冷箭竹^[32]、孝顺竹^[33]、窄叶苦竹^[33]、小蓬竹^[34]等多种竹类植物的根际土壤可培养细菌进行了研究。研究结果发现,竹类植物的根际土壤可培养细菌中,芽孢杆菌门、假单胞菌门、放线菌门等为优势菌门,芽孢杆菌科占绝对优势^[12,29-34]。本研究以我国南部主要经济竹种摆竹为研究对象,从其根际土壤中共分离获得 70 株细菌,主要归属于假单胞菌门、芽孢杆菌门、放线菌门和拟杆菌门;从科水平来看,摆竹根际土壤中的优势科为伯克霍尔德氏菌科,其次为芽孢杆菌科和类芽孢杆菌科。这与其他竹类植物根际可培养细菌种群的分析结果基本一致,表明上述类群广泛存在于竹类植物中。

在获得可培养细菌的基础上,本研究进一

步挖掘了具有产 IAA、铁载体、无机磷溶解、有机磷矿化和解钾功能的菌株。共筛选获得 37 株功能细菌,分属于芽孢杆菌科、伯克霍尔德氏菌科、罗河杆菌科和微球菌科等。目前对于这些菌科功能评价和促生机制的研究已较为深入,尤其是具有极大潜力的芽孢杆菌(*Bacillus*)。芽孢杆菌被验证具有多种功能,作为自然界中已发现的最具耐受性的菌株之一,常被用于制作菌剂或菌肥,广泛应用于生物防治、植物生长促进和土壤改良等领域^[35-36]。前期研究结果发现,芽孢杆菌对多种竹类植物具有有益作用。王思凡等^[13]研究表明,解淀粉芽孢杆菌(*B. amyloliquefaciens*) JL-B06 能够显著提高毛竹幼苗的鲜重;李凤等^[37]将解淀粉芽孢杆菌 B01-2 与枯草芽孢杆菌(*B. subtilis*) B23-1 复配,发现其对杂交竹枯萎病有防治作用,同时诱导激发杂交竹过氧化物酶(peroxidase, POD)等防御酶的活性。本研究共筛选获得了 3 株具有潜在植物促生功能的芽孢杆菌菌株,可为后续摆竹高效复合微生物菌剂的开发和利用提供菌株资源。

值得注意的是,本研究还筛选获得了 10 株具有潜在植物促生功能的伯克霍尔德氏菌科细菌。前期研究结果表明,伯克霍尔德氏菌科(*Burkholderiaceae*)中的一些类群也具有植物促生功能,并且这些类群的促生功能能够适应多种生境,应用范围广泛,是化学肥料的优质替代品^[38]。王琪等^[39]将 *Burkholderia* sp. GD17 接种于黄瓜幼苗,通过对黄瓜生理生化指标及相关基因表达的分析,揭示了其促进幼苗生长和缓解干旱胁迫的机制。本研究中复合使用的吡咯伯克霍尔德氏菌,其菌株 JK-SH007 被闵莉静等^[40]研究证实能够促进黄瓜幼苗的生长并改善番茄挂果;克斯腾伯斯副伯克霍尔德氏菌株 R2A SHY-3 能够促进水稻根系砷的转化^[41]。值得一提的是,本研究首次报道了沼泽伯克霍尔

德氏菌具有潜在植物促生功能。

微生物组在促进动植物生长等方面发挥着重要作用。近年来,合成群落概念的引入使微生物组的研究更加简单、高效,促进了理论向实际应用的转化,已成为未来研究及应用的新趋势^[42]。袁宗胜^[43]解析了施加复合微生物菌剂后毛竹土壤细菌群落结构的变化,发现复合菌剂能够调节土壤矿质元素、改善土壤 pH;刘耀辉等^[44]向毛竹根际接种溶磷菌复合菌液,显著增加了毛竹的苗高、地径及根系活力等,同时显著提高了土壤有效磷的含量。本研究将功能评价良好的 3 株伯克霍尔德氏菌进行了复合,回接试验结果发现合成群落 FH 对毛竹幼苗生长具有促进作用,同时有助于毛竹竹鞭的生长。

在进行促生效果评价的过程中,本研究仅采用了叶长和株高 2 个指标。在后续研究中,将利用更多形态和生理生化指标进行综合评估。同时,本研究仅挖掘了具有产 IAA、产铁载体、溶磷和解钾功能的菌株,而对于本次未验证出功能的菌株,其存在的生态意义同样值得深入探讨。另外,竹鞭是竹类植物生长与繁殖的重要器官,对于合成群落 FH 促进发鞭的分子机制还有待于深入研究。考虑到摆竹无实生苗,本研究利用毛竹实生苗进行回接试验。在后续研究中,将以摆竹鞭生苗为研究对象,通过回接试验系统评价合成群落对摆竹生长的影响,并深入解析其机制;同时,通过扩增子测序、宏基因组学分析以及人工智能学习等方法,构建更丰富稳定、科学高效的跨界微生物合成群落。

致谢

特别感谢李潞滨研究员在论文撰写过程中提供的深刻讨论和建设性反馈。

作者贡献声明

杨芾:研究设计、数据收集和分析,撰写初稿;岳晋军:提供研究所需的关键资源和材料,并对研究结果进行验证;袁金玲:参与实验设计,进行了实验室工作,并协助数据分析;孙启武:文献综述,并对研究方法提供了关键建议;刘蕾:研究构思与设计,参与数据解读,对论文的最终修订提供了重要反馈。

作者利益冲突公开声明

作者声明不存在任何可能会影响本文所报告工作的已知经济利益或个人关系。

参考文献

- [1] 中国科学院中国植物志委员会. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 208.
Chinese Academy of Sciences Flora of China Committee. Flora of China[M]. Beijing: Science Press, 1996: 208 (in Chinese).
- [2] 丁森, 王焱, 陆蓝翔, 张岳峰, 江明明, 魏奇, 叶建仁. 一株促生抗病的樱花内生细菌的分离、筛选和鉴定[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2019, 43(5): 81-88.
DING S, WANG Y, LU LX, ZHANG YF, JIANG MM, WEI Q, YE JR. Isolation, screening and identification of an endophytic bacteria in *Cereas* with resistance to *Agrobacterium tumefaciens* and phosphorus solubilizing ability[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2019, 43(5): 81-88 (in Chinese).
- [3] 申建波, 白洋, 韦中, 储成才, 袁力行, 张林, 崔振岭, 丛汶峰, 张福锁. 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.
SHENG JB, BAI Y, WEI Z, CHU CC, YUAN LX, ZHANG L, CUI YL, CONG WF, ZHANG FS. Rhizobiont: an interdisciplinary innovation and perspective for harmonizing resources, environment, and food security[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(4): 805-813 (in Chinese).
- [4] SANTOYO G, MORENO-HAGELSIEB G, DEL CARMEN OROZCO-MOSQUEDA M, GLICK BR. Plant growth-promoting bacterial endophytes[J]. Microbiological Research, 2016, 183: 92-99.
- [5] EID AM, FOUDA A, ABDEL-RAHMAN MA, SALEM SS, ELSAIED A, OELMÜLLER R, HIJRI M, BHOWMIK A, ELKELISH A, HASSAN SE. Harnessing bacterial endophytes for promotion of plant growth and biotechnological applications: an overview[J]. Plants, 2021, 10(5): 935.
- [6] 翁凌胤, 梁冬冬, 周大朴, 郭庆港, 王光州, 张俊伶. 利用合成菌群促进作物健康: 进展与展望[J]. 应用生态学

- 报, 2024, 35(3): 847-857.
- WENG LY, LUAN DD, ZHOU DP, GUO QG, WANG GZ, ZHANG JL. Improving crop health by synthetic microbial communities: progress and prospects[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(3): 847-857 (in Chinese).
- [7] LIU YX, QIN Y, BAI Y. Reductionist synthetic community approaches in root microbiome research[J]. Current Opinion in Microbiology, 2019, 49: 97-102.
- [8] 周芳芳, 李晓婷, 汤利. 合成菌群促生抗逆功能的研究进展[J]. 土壤, 2023, 55(6): 1170-1175.
- ZHOU FF, LI XT, TANG L. Growth promotion and stress resistance of synthetic microbial community: a review[J]. Soils, 2023, 55(6): 1170-1175 (in Chinese).
- [9] 袁宗胜, 刘芳, 章进峰, 陈洪华, 郭建芳, 曾志浩, 王思凡, 王英姿, 潘辉. 毛竹周年生长特性(大小年)对根际细菌和内生细菌群落结构及多样性的影响[J]. 福建农业学报, 2023, 38(2): 1-9.
- YUAN ZS, LIU F, ZHANG JF, CHEN HH, GUO JF, ZENG ZH, WANG SF, WANG YZ, PAN H. Rhizosphere and endophytic bacterial communities in years of alternating growth of *Phyllostachys edulis* forest[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2023, 38(2): 1-9 (in Chinese).
- [10] 姚胜勋, 梁爱湖, 陆素芬, 盘子涵, 李启虔, 潘远梅. 龙江河河岸带撑篙竹根际与非根际土壤细菌群落特征[J]. 广西科学, 2023, 30(3): 455-467.
- YAO SX, LIANG AH, LU SF, PAN ZH, LI QQ, PAN YM. Characteristics of soil bacterial communities in rhizosphere and bulk soil of *Bambusa pervariabilis* McClure in the riparian zone of Longjiang River[J]. Guangxi Sciences, 2023, 30(3): 455-467 (in Chinese).
- [11] 殷婷婷, 王国振, 闫妍, 高霞莉, 温洪宇. 桂竹根际土壤细菌群落多样性的季节变化[J]. 江苏师范大学学报(自然科学版), 2016, 34(2): 56-59.
- YIN TT, WANG GZ, YAN Y, GAO XL, WEN HY. Seasonal variation of bacteria community in the rhizosphere of *Phyllostachys bambusoides* forest[J]. Journal of Jiangsu Normal University (Natural Science Edition), 2016, 34(2): 56-59 (in Chinese).
- [12] 杨芾, 王辉, 王琴, 姜春前, 周妍旭, 李璐滨. 浙江地区毛竹林根际土壤促生细菌筛选及促生效应研究[J/OL]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2024. <https://link.cnki.net/urlid/32.1161.S.20240312.1126.002>.
- YANG F, WANG H, WANG Q, JIANG CQ, ZHOU YX, LI LB. Screening of growth promoting bacteria in the rhizosphere soil of *Phyllostachys edulis* and study on the growth promoting effects in Zhejiang Province[J/OL]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2024. <https://link.cnki.net/urlid/32.1161.S.20240312.1126.002> (in Chinese).
- [13] 王思凡, 刘芳, 章进峰, 陈洪华, 郭建芳, 王英姿, 袁宗胜, 潘辉. 内生促生细菌对毛竹幼苗生长特性及酶活性的影响[J]. 防护林科技, 2023(4): 24-27, 82.
- WANG SF, LIU F, ZHANG JF, CHEN HH, GUO JF, WANG YZ, YUAN ZS, PAN H. Effects of endogenous growth-promoting bacteria on growth characteristics and enzyme activities of *Phyllostachys edulis* seedlings[J]. Protection Forest Science and Technology, 2023(4): 24-27, 82 (in Chinese).
- [14] 荣良燕, 姚拓, 赵桂琴, 柴强, 席琳乔, 王小利. 产铁载体 PGPR 菌筛选及其对病原菌的拮抗作用[J]. 植物保护, 2011, 37(1): 59-64.
- RONG LY, YAO T, ZHAO GQ, CHAI Q, XI LQ, WANG XL. Screening of siderophore-producing PGPR bacteria and their antagonism against the pathogens[J]. Plant Protection, 2011, 37(1): 59-64 (in Chinese).
- [15] RAJAWAT MVS, SINGH S, TYAGI SP, SAXENA AK. A modified plate assay for rapid screening of potassium-solubilizing bacteria[J]. Pedosphere, 2016, 26(5): 768-773.
- [16] LANE DJ. 16S/23S rRNA sequencing[M]//Nucleic Acid Techniques in Bacterial Systematics. New York: A Wiley Interscience Publication, 1991: 155-175.
- [17] KUMAR S, STECHER G, LI M, KNYAZ C, TAMURA K. MEGA X: molecular evolutionary genetics analysis across computing platforms[J]. Molecular Biology and Evolution, 2018, 35(6): 1547-1549.
- [18] EDGAR RC. MUSCLE v5 enables improved estimates of phylogenetic tree confidence by ensemble bootstrapping[J]. Journal of Evolutionary Biology, 2021, 34(2): 123-134.
- [19] 崔伟国, 尹彦舒, 张方博, 崔曼, 杨荣, 张树清, 郑红丽, 高森. 马铃薯细菌多样性解析及促生高产 IAA 菌株的筛选[J]. 中国土壤与肥料, 2020(1): 223-231.
- CUI WG, YIN YS, ZHANG FB, CUI M, YANG M, ZHANG SQ, ZHENG HL, GAO M. Analysis of potato bacterial diversity and screening of high-yielding IAA strains[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020(1): 223-231 (in Chinese).
- [20] PAYNE SM. Detection, isolation, and characterization of siderophores[M]//Methods in Enzymology. Amsterdam: Elsevier, 1994: 329-344.
- [21] 王义, 余贤美, 郑服丛. 热带土壤解磷细菌 PSB26 的筛选鉴定及拮抗初探[J]. 安徽农学通报, 2009, 15(7): 59-62.
- WANG Y, YU XM, ZHENG FC. Screening of phosphate solubilizing bacterias (PSB26) from the tropical soils and the study of its antagonism[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2009, 15(7): 59-62 (in Chinese).
- [22] 东秀珠, 蔡妙英. 常见细菌系统鉴定手册[M]//细菌和古菌常用鉴定方法. 北京: 科学出版社, 2001.
- DONG XZ, CAI MY. Handbook of identification of common bacterial systems[M]//Common Identification Methods for Bacteria and Archaea. Beijing: Science Press, 2001 (in Chinese).
- [23] WICKHAM H. Ggplot2: elegant graphics for data analysis[M]//Build a Plot Layer by Layer. New York: Springer, 2009: 89-107.
- [24] CORP I. IBM SPSS statistics for windows, version 26.0 [M]. New York: Armonk, 2019.
- [25] VIALARD V, POIRIER I, COURNOYER B, HAURAT J, WIEBKIN S, OPHEL-KELLER K, BALANDREAU J. *Burkholderia graminis* sp. nov., a rhizospheric *Burkholderia* species, and reassessment of [*Pseudomonas*] phenazinium, [*Pseudomonas*] pyrrocinia and [*Pseudomonas*] glathei as *Burkholderia*[J]. International Journal of Systematic Evolutionary Microbiology, 1998, 48(2): 549-563.
- [26] ONG KS, AW YK, LEE LH, YULE CM, CHEOW YL, LEE SM. *Burkholderia paludis* sp. nov., an antibiotic-siderophore producing novel *Burkholderia cepacia* complex species, isolated from Malaysian tropical peat swamp soil[J]. Frontiers in Microbiology, 2016, 7: 2046.
- [27] STEENKAMP ET, van ZYL E, BEUKES CW, AVONTUUR JR, CHAN WY, PALMER M, MTHOMBENI LS, PHALANE FL, SEREME TK, VENTER SN. *Burkholderia kirstenboschensis* sp. nov. nodulates papilionoid legumes indigenous to South Africa[J]. Systematic and Applied Microbiology, 2015,

- 38(8): 545-554.
- [28] 吴义远, 董文渊, 浦婵, 钟欢, 夏莉, 袁翎凌, 陈新. 土壤水分和养分对笋竹竹鞭解剖特征及其适应可塑性的影响[J]. 竹子学报, 2023, 42(1): 1-10.
- WU YY, DONG WY, PU C, ZHONG H, XIA L, YUAN LL, CHEN X. Anatomical characteristics and adaptive plasticity of *Qiongzhuea tumidinoda* rhizome under different soil moisture and nutrients conditions[J]. *Journal of Bamboo Research*, 2023, 42(1): 1-10 (in Chinese).
- [29] 王晓静, 李潞滨, 王涛. 竹类植物内生菌研究进展[J]. 竹子学报, 2020, 39(4): 34-39.
- WANG XJ, LI LB, WANG T. Research progress of endophytes in bamboo[J]. *Journal of Bamboo Research*, 2020, 39(4): 34-39 (in Chinese).
- [30] 李潞滨, 刘敏, 杨淑贞, 刘亮, 缪崑, 杨凯, 韩继刚. 毛竹根际可培养微生物种群多样性分析[J]. 微生物学报, 2008, 48(6): 772-779.
- LI LB, LIU M, YANG SZ, LIU L, MIAO K, YANG K, HAN JG. Cultivable microbial diversity at the rhizosphere of *Phyllostachys pubescens*[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2008, 48(6): 772-779 (in Chinese).
- [31] 翟婉璐. 不同年限覆盖雷竹林土壤性质变化过程及其对生物空间布局的影响[D]. 北京: 中国林业科学研究院硕士学位论文, 2017.
- ZHAI WL. The changes of soil properties and its effect biomass allocation pattern of *Phyllostachys praecox* in different mulching cultivation periods[D]. Beijing: Master's Thesis of Chinese Academy of Forestry, 2017 (in Chinese).
- [32] 刘敏, 李潞滨, 杨凯, 韩继刚, 朱宝成, 彭镇华. 冷箭竹根际土壤中可培养细菌的多样性[J]. 生物多样性, 2008, 16(1): 91-95.
- LIU M, LI LB, YANG K, HAN JG, ZHU BC, PENG ZH. Culturable bacterial diversity in rhizosphere of *Bashania fangiana*[J]. *Biodiversity Science*, 2008, 16(1): 91-95 (in Chinese).
- [33] 高亮, 冯歌林, 严淑娟, 秦华, 陈俊辉, 梁辰飞, 徐秋芳. 不同竹子内生细菌结构和多样性比较研究[J]. 竹子学报, 2019, 38(3): 39-46.
- GAO J, FENG GL, YAN SX, QIN H, CHEN JH, LIANG CF, XU QF. Comparison on structure and diversity of endophytic bacteria between three species of bamboo[J]. *Journal of Bamboo Research*, 2019, 38(3): 39-46 (in Chinese).
- [34] 李鹏, 刘济明, 文爱华, 高攀, 王军才, 莫会影. 小蓬竹根际土壤可培养细菌多样性[J]. 微生物学报, 2016, 56(7): 725-732.
- LI P, LIU JM, WEN AH, GAO P, WANG JC, MO HY. Culturable bacterial diversity in the rhizosphere soil of *Bambusa multiplex*[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2016, 56(7): 725-732 (in Chinese).
- [35] 王佳, 李明聪. 微生物菌肥在植物减肥增效中的应用研究进展: 以果树为例[J]. 微生物学通报, 2024, 51(11): 4394-4415.
- WANG J, LI MC. Research progress in the application of microbial fertilizers in chemical fertilizer reduction and efficiency increase in orcharding[J]. *Microbiology China*, 2024, 51(11): 4394-4415.
- [36] 李娅娣, 王瀚祥, 胡柏耿, 杨辉, 胡新喜, 熊兴耀, 王万兴. 植物根际促生菌缓解园艺作物非生物胁迫研究进展[J]. 园艺学报, 2024, 51(8): 1964-1976.
- LI YD, WANG HX, HU BG, YANG H, HU XX, XIONG XY, WANG WX. Research progress on plant growth promoting rhizobacteria to alleviate abiotic stress tolerance of horticultural crops[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2024, 51(8): 1964-1976.
- [37] 李凤, 刘会涛, 田莎, 刘应高. 复配芽孢杆菌对撑绿杂交竹枯萎病的生物防治效果研究[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(12): 76-84.
- LI F, LIU HT, TIAN S, LIU YG. Biological control effect of compounded bacillus on wilt disease of *Bambusa pervariabilis* × *Dendrocalamopsis daii*[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2018, 40(12): 76-84 (in Chinese).
- [38] 解星丽, 吴小芹. 多噬伯克霍尔德氏菌 WS-FJ9 对林木病原菌的拮抗作用及代谢产物的稳定性[J]. 微生物学通报, 2021, 48(6): 1985-1996.
- XIE XL, WU XQ. Antagonism against forest pathogens and stability of fermentation broth of *Burkholderia multivorans* WS-FJ9[J]. *Microbiology China*, 2021, 48(6): 1985-1996 (in Chinese).
- [39] 王琪, 胡哲, 富薇, 李光哲, 郝林. 伯克霍尔德氏菌 GD17 对黄芩幼苗耐干旱的调节[J]. 生物技术通报, 2023, 39(3): 163-175.
- WANG Q, HU Z, FU W, LI GZ, HAO L. Regulation of *Burkholderia* sp. GD17 on the drought tolerance of cucumber seedlings[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2023, 39(3): 163-175 (in Chinese).
- [40] 闵莉静, 郭璐, 叶建仁. 基于嗜铁素介导的吡咯伯克霍尔德氏菌 JK-SH007 促生作用机制研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2019, 43(6): 165-172.
- MIN LJ, GUO L, YE JR. Mechanism of *Burkholderia pyrrocinia* JK-SH007 growth-promoting to plant via siderophore-mediation[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2019, 43(6): 165-172 (in Chinese).
- [41] CHEN C, YANG BY, GAO AX, YU Y, ZHAO FJ. Transformation of arsenic species by diverse endophytic bacteria of rice roots[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 309: 119825.
- [42] 刘伟伟, 吴冰, 向梅春, 刘杏忠. 从微生物组到合成功能菌群[J]. 微生物学通报, 2017, 44(4): 881-889.
- LIU WW, WU B, XIANG MC, LIU XZ. From microbiome to synthetic microbial community[J]. *Microbiology China*, 2017, 44(4): 881-889 (in Chinese).
- [43] 袁宗胜. 复合微生物菌剂对毛竹土壤细菌群落结构的影响[J]. 福建农业学报, 2024, 39(4): 438-447.
- YUAN ZS. Soil microbiome at *Phyllostachys edulis* forest affected by application of bioagent[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2024, 39(4): 438-447 (in Chinese).
- [44] 刘耀辉, 盛可银, 罗建荣, 郑淇元, 王菲, 修玉冰, 张玉文, 胡冬南, 张文元. 溶磷菌混施对土壤微生物群落及毛竹生长的影响[J]. 江西农业大学学报, 2023, 45(2): 298-310.
- LIU YH, SHENG KY, LUO JR, ZHENG QY, WANG F, XIU YB, ZHANG YW, HU DN, ZHANG WY. Effects of phosphorus solubilizing bacterial compound suspensions on growth of moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) and soil microbial community structures[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2023, 45(2): 298-310 (in Chinese).