

· 园艺 ·

DOI: 10.15886/j.cnki.rdswwb.20230138



主持人:朱国鹏

火龙果根际促生微生物筛选及其效应

龚文坤, 伍巧慧, 王 钢, 杨劲明, 吕荣婷, 王蓓蓓

(海南大学 热带农林学院 海口 570228)

摘 要: 利用固氮、解磷、解钾及产IAA(吲哚乙酸)培养基从火龙果根际土壤中筛选出具有相应能力的一株木霉和一株芽孢杆菌, 利用盆栽实验测定其发酵液对火龙果的促生效应。盆栽实验结果表明, 从火龙果根际土壤中筛选出具有溶磷、解钾、固氮、产IAA能力的菌株F6、B3, 其中F6(加纳木霉)固氮、产IAA能力最强, B3(贝莱斯芽孢杆菌)溶磷、解钾能力最强。盆栽试验结果表明, 接种菌剂显著提高火龙果农艺性状, 其中复合菌剂(B3+F6)效果最明显, 鲜质量增加量提高33.09%, 干质量增加量提高23.11%。接种菌剂能改善土壤肥力, 显著提高土壤有效磷、速效钾、有机质含量, 接种单个菌株B3、F6处理相较于CK处理有效磷含量分别提高了14.49%、9.9%; 速效钾含量提高了10.4%、16.47%; 碱解氮含量提高了25.85%、14.35%; 接种混合菌株B3+F6处理相较于CK处理有效磷、速效钾、有机质含量分别提高了37.02%、12.64%、16.77%。土壤理化性质与火龙果促生指标相关性分析结果表明, 接种复合菌剂下, 土壤速效钾含量与火龙果地上部鲜质量、地上部干质量、火龙果氮磷钾积累存在显著正相关。由以上可以得出, 接种B3和F6复合菌剂对火龙果地上部分鲜质量、干质量及火龙果根系具有明显提升效果, 对火龙果氮磷钾营养元素的累积有增效作用, 同时具有提高土壤肥力的功效。

关键词: 火龙果; 促生微生物; 解磷; 固氮; 解钾

中图分类号: S154.3

文献标志码: A

文章编号: 1674-7054(2024)05-0632-07

龚文坤, 伍巧慧, 王钢, 等. 火龙果根际促生微生物筛选及其效应[J]. 热带生物学报, 2024, 15(5):646-652. doi: 10.15886/j.cnki.rdswwb.20230138

火龙果(*Hylocereus undulatus* Britt.&Rose), 主要集中在种植在广西、广东、云南、海南等热带亚热带地区^[1], 是海南水果种植中重要的热带水果, 具有较高的营养价值^[2]、药用价值^[3]以及观赏价值^[4]。植物根际互作微生物是一种存在植物根系的特殊微生物群体, 其中有2%~5%的微生物对植物的生长有着直接或间接的作用, 这类微生物通过溶磷、解钾、固氮、产IAA(吲哚乙酸)等功能直接或间接地促进植物的生长, 提高作物的产量和品质^[5-8]。溶磷微生物在生长代谢过程中产生的有机酸和无机酸可降低周围环境pH, 使难溶性磷降解为植物可以吸收利用的有效磷; 解钾微生物分泌含有羧

基和羧基的有机酸可与矿物中的金属离子发生反应, 形成金属-有机配合物, 从而破坏矿物的结构, 促进矿物中钾的转化; 植物根际互作微生物还可利用生物固氮, 为植物提供氮素; 植物根际互作微生物在生长活动中会分泌多种植物激素, 如IAA、ACC(1-氨基环氧丙烷酸)脱氨酶、赤霉素等^[9-14]。

目前已有的研究表明, 火龙果根际存在大量对火龙果生长有作用的微生物, 用这类微生物发酵的微生物有机肥对火龙果具有明显增产效果^[15]; 利用微生物菌肥粗提物作为火龙果生根培养基, 对比其他土壤-吲哚乙酸培养基, 具有显著的促生作用^[16]; 通过接种具有解磷解钾等功能的菌

收稿日期: 2023-12-12

修回日期: 2024-05-14

基金项目: 海南省重点研发计划项目(ZDYF2021XDNY279); 国家自然科学基金项目(42367015); 海南省自然科学基金高层次人才项目(320RC483; 422RC778)

第一作者: 龚文坤(1999-), 男, 海南大学热带农林学院2021级硕士研究生。E-mail: 2744341256@qq.com

通信作者: 王蓓蓓(1987-), 女, 博士, 副教授。研究方向: 土壤微生物。E-mail: 345814069@qq.com

种,可以在一定程度上减少田间肥料的使用量^[17-18]。目前,在火龙果弱酸性红壤中筛选出的微生物主要有假单胞菌、芽孢杆菌和类诺卡氏菌^[19],但鲜见报道从火龙果根际土壤中筛选出具有溶磷、解钾、固氮以及产IAA促生功能等菌株。海南地处热区,常年气温较高,有机肥受高温环境影响,有效活菌数量降低,因此对农用微生物的环境适应性有更高的要求。基于此,本研究从海南岛火龙果生产过程中肥料利用率低出发,通过在火龙果根际土壤中筛选固氮、解磷、解钾、产IAA能力较强的根际促生微生物,探究其对火龙果的促生效果和对土壤的影响,为火龙果微生物菌剂的研发提供菌种资源。

1 材料与方法

1.1 试验材料 功能菌株筛选使用的根际土壤采自海南岛东方市(19°18'N,108°90'E)火龙果种植基地。利用五点采样法,获得火龙果根系及部分土壤,分装标记后于4℃保存运回实验室。利用稀释涂布法获得同一培养基上外观和气味不同菌株。

1.2 菌株解磷解钾测定 将菌株接种于相应的液体培养基中活化3~5 d,取2%的菌液接种于液体解无机磷培养基和解无机钾培养基^[20-21],180 r·min⁻¹、28℃振荡培养7 d,取发酵液于离心管,10 000 r·min⁻¹离心2 min,取上清液,测定解磷解钾效果;解磷效果通过钼锑抗比色法测定,解钾效果通过火焰原子吸收测定^[22]。

1.3 产IAA能力测定 将分离纯化后的菌株接种于含有20 mL IAA液体培养基中,180 r·min⁻¹,28℃振荡培养3 d,10 000 r·min⁻¹离心2 min,取上清液与等体积的Salkowski比色液混匀,避光显色30 min后,530 nm测定吸光值,以纯IAA的吸光值制作标准曲线。

1.4 固氮能力的测定 取能够在固氮培养基上正常生长的菌株,细菌接种于LB培养基,真菌接种于PDA培养基,培养3~5 d后,以1%的接种量接种于相应的液体固氮培养基中,28℃、180 r·min⁻¹振荡培养5~7 d后,取菌株悬液10 000 r·min⁻¹离心,取上清液,以不加菌的LB培养基和PDA培养基作为对照,凯氏法测定菌株发酵液中氮含量。

1.5 菌株鉴定 将纯化的优势细菌(B3)和真菌(A2、F6)分别接种于固体LB和PDA培养基上,

37℃倒置培养5~7 d,送至武汉市擎科生物有限公司进行16 s和ITS扩增并测定菌株基因序列。将碱基序列在NCBI数据库中进行比对,筛选同源性高的序列,使用MEGA 11.0软件以Neihbor-Jioning Tree构建系统进化树。

1.6 盆栽试验 火龙果盆栽试验于2022年11月—2023年5月在海南大学试验基地进行。供试土壤为沙土,其pH值为7.15,有效磷含量50.68 mg·kg⁻¹,速效钾含量47.98 mg·kg⁻¹,碱解氮含量8.54 mg·kg⁻¹,有机质含量3.20 mg·kg⁻¹。选取长度粗细均一的火龙果老茎扦插,称量每株扦插老茎的质量并记录,火龙果茎较老的一端5 cm留出,每盆盆栽均加入100 g羊粪做底肥,设计A2、B3、F6、B3+F6(经接入平板对比B3和F6无拮抗作用)、CK五组试验,其中A2、B3、F6、B3+F6均为添加对应菌液,真菌F6、A2培养7 d分别获得活菌数达6.1×10⁸个·mL⁻¹、4.4×10⁸个·mL⁻¹水悬浮液,无菌水稀释成1×10⁸个·mL⁻¹菌剂;细菌B3培养5 d获得活菌数达9.9×10⁸个·mL⁻¹菌液,无菌水稀释成1×10⁸个·mL⁻¹菌剂。每7 d浇1次菌剂,共浇灌5次,每株浇菌液10 mL,复合菌株B3和F6分别5 mL,CK浇灌同等量无菌水做对照。盆栽实验3个月后测定火龙果植株鲜质量、干质量、根长、水位取代法测定根体积以及土壤理化性质等,计算火龙果鲜质量增加量,鲜质量增加量(g)=收获火龙果鲜质量-扦插前老茎鲜质量。

1.7 数据处理 利用Excel 2010和SPSS 22进行数据统计分析,使用最小显著差异法(LSD)检验进行多重比较($P < 0.05$)和皮尔逊相关性分析。

2 结果与分析

2.1 菌株解磷解钾能力分析 在火龙果根际土壤中分离出3株优势菌株,其中B3为细菌,A2和F6为真菌,测试其发酵液中物质含量,3株菌固氮、产IAA、解磷、解钾能力如表1;F6固氮量最大,为7.67 mg·L⁻¹,A2与B3菌株固氮量分别为4.40 mg·L⁻¹、5.67 mg·L⁻¹。3株菌产IAA效果明显,其中,F6产IAA能力最强,IAA含量为24.46 mg·L⁻¹,A2与B3菌株产IAA量分别为12.56、18.36 mg·L⁻¹。菌株解磷量最大的是B3,达到98.71 mg·L⁻¹,其次是A2,解磷量为71.33 mg·L⁻¹。菌株解钾量最大的是B3,为28.62 mg·L⁻¹,菌株A2与F6解钾能力相近,分别为14.58、15.31 mg·L⁻¹。

表 1 菌株特定能力测定

Tab. 1 Functional testing of bacterial strains

| 菌株 strain | 固氮量/(mg·L ⁻¹) Nitrogen fixation capacity | IAA 含量/(mg·L ⁻¹) IAA content | 有效磷含量/(mg·L ⁻¹) Available phosphorus content | 速效钾含量/(mg·L ⁻¹) Available potassium content |
|--------------|---|---|---|--|
| A2 | 4.40 ± 0.63a | 12.56 ± 0.26a | 71.33 ± 4.45a | 14.58 ± 0.99a |
| F6 | 7.67 ± 0.40b | 24.46 ± 1.61b | 48.10 ± 5.88b | 15.31 ± 1.74a |
| B3 | 5.67 ± 0.12c | 18.36 ± 0.68c | 98.71 ± 8.06c | 28.62 ± 3.41b |

注: A2、F6、B3 分别为对应接种菌株, a、b、c 表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: A2, F6 and B3 are strains used for inoculation. Different lowercase letters indicate significant difference in the same index of different treatments ($P < 0.05$).

2.2 优势菌株鉴定 根据 3 株优势菌株的解磷、解钾、固氮以及产 IAA 情况, 选择 F6 和 B3 菌株进一步研究, 优势菌株 B3 和 F6 菌株系统进化树如图 1, 菌株形态如图 2: 菌株 F6 为絮状, 菌落质地丝绒状, 菌落中央为深绿色, 向外逐渐变浅, 边缘呈白色, 其形态与张勇等^[23]在《耐热真菌五个中国新记录种》中描述相似。B3 菌株为白色, 边缘透明且不规则, 中心不透明, 形态与李坤等^[24]筛选的 TC-52 贝莱斯芽孢

杆菌相似。经比对, F6 为加纳木霉 (*Trichoderma ghanense*), B3 为贝莱斯芽孢杆菌 (*Bacillus velezensis*)。

2.3 菌株对火龙果的促生效果 菌株对火龙果促生效果如表 2、图 3 所示。由表 2 可知, 加入筛选出的菌剂能有效促进火龙果根的生长、提高其地上部分鲜质量和干质量。加入菌剂的处理中, 火龙果最长根长均有显著促进效果; 火龙果鲜质量均显著大于 CK 处理, 其中加入 B3+F6 菌剂效果最明显, 鲜质量增加量 (鲜质量增加量 = 试验结束时火龙果鲜质量 - 实验开始时火龙果鲜质量) 提高 33.09%; B3、A2 和混合菌剂 (B3+F6) 处理较 CK 处

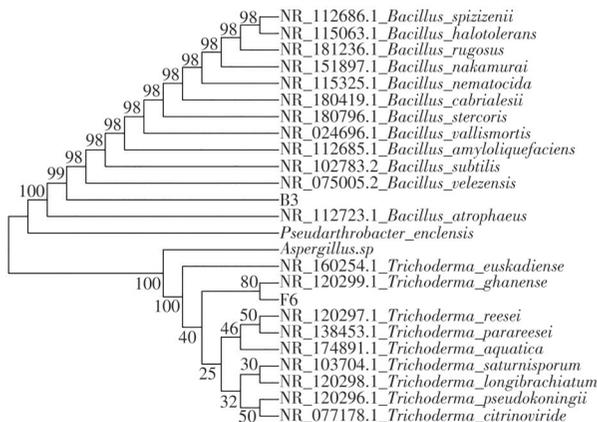


图 1 菌株 B3 和 F6 系统进化树

Fig. 1 Phylogenetic tree of strains B3 and F6

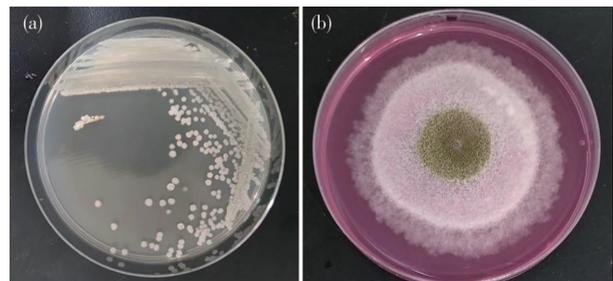


图 2 B3、F6 分别在 LB 培养基和孟加拉红培养基上的形态

Fig. 2 Morphological characteristics of strains B3, F6

a. B3; b. F6

表 2 不同菌剂处理对火龙果生物量的影响

Tab. 2 Effects of different microbial agents on the bioaccumulation of dragon fruit

| 处理 Treatment | 最长根长/cm Longest root length | 鲜质量增加/g Fresh weight | 干质量/g Dry weight | 根体积/cm ³ Root volume |
|-----------------|--------------------------------|-------------------------|---------------------|------------------------------------|
| CK | 12.60 ± 2.29b | 66.34 ± 2.02c | 10.43 ± 0.19b | 7.33 ± 1.52b |
| A2 | 19.47 ± 3.58a | 80.91 ± 6.67ab | 11.96 ± 1.13ab | 8.00 ± 0.00b |
| B3 | 22.20 ± 6.52a | 87.55 ± 6.68a | 12.66 ± 0.80a | 9.33 ± 2.31ab |
| F6 | 22.73 ± 1.56a | 73.21 ± 6.72b | 11.19 ± 0.79b | 7.67 ± 2.57b |
| B3+F6 | 22.20 ± 5.74a | 88.29 ± 5.80a | 12.84 ± 0.74a | 10.67 ± 3.05a |

注: a, b, c 表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$); CK 为无菌水处理; B3+F6 为 B3 和 F6 的混合菌剂。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference in the same index of different treatments ($P < 0.05$). CK is sterile water treatment; B3+F6 is a mixture of microbial agents B3 and F6.



图3 不同菌剂处理对火龙果促生效果

Fig. 3 The effect of different microbial treatments on the growth promotion of dragon fruit

理火龙果干质量有显著增加,其中接入 B3+F6 菌剂效果最明显,干质量提高 23.11%;接入混合菌剂

(B3+F6)的处理较 CK 火龙果根体积有显著增加。

2.4 菌株对土壤理化的影响 由表 3 可知,接种单个菌株 B3、F6 处理比 CK 处理对提升土壤理化性能有效,其中磷含量分别提高了 14.49%、9.9%;速效钾含量提高了 10.4%、16.47%;碱解氮含量提高了 25.85%、14.35%;接种混合菌株 B3+F6 处理比 CK 处理对提升土壤理化性能有效,其中有效磷、速效钾、有机质含量分别提高了 37.02%、12.64%、16.77%。B3+F6 处理比对照 A2 处理对提升土壤理化性能有效,其中有效磷提高 18.65%,有机质提高 18.53%。接种菌剂的处理与 CK 处理对比,pH 都有不同程度的降低,其中接种混合菌剂处理的 pH 降低最为明显,pH 降低了 0.36;接种 F6 处理仅降低 0.03。

表 3 菌株对土壤理化性质的影响

Tab. 3 The influence of bacterial strains on soil physicochemical properties

| 处理 Treatment | 有效磷/(mg·kg ⁻¹) Available phosphorus | 速效钾/(mg·kg ⁻¹) Available potassium | 碱解氮/(mg·kg ⁻¹) Alkaline nitrogen | 有机质/(mg·kg ⁻¹) Organic matter | pH |
|-----------------|--|---|---|--|---------------|
| CK | 52.32 ± 0.63d | 145.52 ± 0.23c | 10.87 ± 0.51c | 10.08 ± 0.28b | 6.97 ± 0.05a |
| A2 | 60.42 ± 1.88bc | 163.05 ± 4.78b | 13.68 ± 0.25a | 9.93 ± 0.18b | 6.82 ± 0.01ab |
| B3 | 59.90 ± 1.96bc | 160.66 ± 1.09b | 11.90 ± 1.04bc | 10.22 ± 0.63b | 6.75 ± 0.05bc |
| F6 | 57.55 ± 4.04cd | 169.17 ± 2.35a | 12.43 ± 0.88b | 11.92 ± 1.10a | 6.94 ± 0.13a |
| B3+F6 | 71.69 ± 3.70a | 163.92 ± 3.68ab | 11.24 ± 0.41bc | 11.77 ± 0.29a | 6.61 ± 0.09c |

注:a, b, c, d 表示不同处理间差异显著(P < 0.05)。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference in the same index of different treatments (P < 0.05).

2.5 土壤理化性质与火龙果促生指标的相关性分析 由表 4 可知,土壤有效磷含量与火龙果全氮含量极显著正相关,与火龙果干质量、鲜质量、全钾含量显著正相关;土壤碱解氮与火龙果全氮、全磷含量显著正相关;土壤有机质与火龙果干质量、

鲜质量、全氮、全钾含量显著正相关;土壤速效钾含量与火龙果根长、干质量、鲜质量、全氮、全钾含量极显著正相关,与火龙果全磷含量显著正相关;土壤 pH 与火龙果干质量、鲜质量、全氮、全钾含量极显著负相关。

表 4 土壤理化性质与火龙果生长指标相关性

Tab. 4 Correlation analysis between soil physicochemical properties and dragon fruit growth indicators

| 指标 Index | 根长 Root length | 根体积 Root volume | 干质量 Dry weight | 鲜质量 Fresh weight | 植物全氮 Plant total nitrogen | 植物全磷 Plant total phosphorus | 植物全钾 Plant total potassium |
|-----------------------------|-------------------|--------------------|-------------------|---------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 有效磷 Available phosphorus | 0.243 | 0.345 | 0.587* | 0.605* | 0.751** | 0.127 | 0.819* |
| 碱解氮 Alkaline nitrogen | 0.150 | 0.150 | 0.273 | 0.207 | 0.566* | 0.573* | 0.288 |
| 有机质 Organic matter | 0.265 | 0.265 | 0.610* | 0.634* | 0.553* | -0.170 | 0.627* |
| 速效钾 Available potassium | 0.674** | 0.128 | 0.743** | 0.777** | 0.815** | 0.615* | 0.895** |
| pH | -0.399 | -0.174 | -0.662** | -0.688** | -0.753** | -0.284 | -0.832** |

注:“*”在 0.05 级别(双尾)相关性显著。“**”在 0.01 级别(双尾)相关性显著。

Note: * indicates a significant correlation at the 0.05 level (two-tailed); ** means a significant correlation at the 0.01 level (two-tailed).

3 讨论

火龙果根际存在大量芽孢杆菌和木霉,这两类微生物将土壤中植物难于利用的营养元素转化为可供植物易利用的形态,供火龙果吸收利用,是可持续化农业发展的重要资源。目前绝大部分研究是从水稻、大豆、小麦等植物根系中筛选出具有一定功能的芽孢杆菌和木霉,刘悦等^[25]从大豆根际土壤中筛选出2株具有溶磷解钾等功能的芽孢杆菌,陈多菲等^[26]从东北地区水稻根际中筛选出高效固氮能力的芽孢杆菌N2。其他研究者还从玉米、青稞、烟草等作物土壤中分离出具有溶磷、解钾、固氮及产IAA能力的微生物^[27-28],但未见到从热区火龙果根际土壤中筛选溶磷、解钾、固氮及产IAA能力的微生物的报道。

菌株产IAA作用机理主要是菌株代谢过程产生IAA,目前已有的研究中芽孢杆菌产IAA效果比较明显,例如特基拉芽孢杆菌(*Bacillus tequilensis*)、阿耶波多氏芽孢杆菌(*Bacillus aryabhattai*)^[29]。微生物固氮主要的作用机理是植物与根瘤菌共生,固氮微生物通过酶促反应把大气中游离态的氮还原为氨^[30]。目前,对固氮微生物的报道主要是对土壤固氮微生物的调查,少有在根际土壤中筛选固氮微生物的报道,仅有周丽秀等^[31]从小麦根际土壤中筛选出2株自生固氮菌GN3和GN4,分别属于变形菌门和厚壁菌门,这2株菌在固氮培养基上正常生长,而本研究定量测定的B3和F6的固氮量,分别达到5.67和7.67 mg·L⁻¹,另外,产IAA含量也分别达到18.36、24.46 mg·L⁻¹。这说明B3和F6具有一定固氮和产IAA能力。

有研究表明,芽孢杆菌和木霉具有溶磷能力,能将难溶性磷源转化为可溶性磷,供植物生长利用^[32]。目前报道比较多的根际溶磷微生物是木霉属和曲霉属,伍巧慧等^[33]从哈密瓜根际土壤中筛选的烟曲霉F9的溶磷能力的研究中,发现培养5 d的烟曲霉F9的溶磷量为457.69 mg·L⁻¹。任季平等^[34]测试木霉的溶磷效果,发现单一木霉T6在培养第8 d时溶磷量达到最大,为90.91 mg·L⁻¹。从热区筛选溶磷芽孢杆菌的研究鲜见报道,本研究利用定量法测定菌株B3、F6溶磷量,结果发现B3(贝莱斯芽孢杆菌)、F6(加纳木霉)在培养7 d时的溶磷量分别为98.71、48.10 mg·L⁻¹。这表明B3菌株具有较好的溶磷能力。不同菌株间的溶磷能力差异大,究其原因,可能是不

同的菌株对同一难溶磷源的作用机理不同。

水溶性钾、交换性钾可作为植物可直接利用的速效钾,但90%以上的钾元素都存在于硅酸盐矿物中,因此需要将矿物钾降解成植株所能吸收利用的有效钾。在菌株解钾能力的研究中,发现B3和F6的培养液中可溶性钾素达到28.62、15.31 mg·L⁻¹。这说明B3和F6对难溶性钾具有较好的溶解作用。此外,王彦佳等^[35]筛选紫花苜蓿中的解钾菌,其中解钾菌XLT-4鉴定为巨大芽孢杆菌。刘子瑶等^[36]探究贝莱斯芽孢杆菌LXS-N2的功能特性,发现LXS-N2具有解钾能力。在本研究中贝莱斯芽孢杆菌解钾效果很好地为上述研究结果提供了有力支持。

有研究表明,接种ZX-2020菌株的玉米幼苗的根长增加54.49%,鲜质量增加1.93%,通过筛选土壤中的溶磷微生物并将其利用于黄瓜幼苗,能促使黄盖幼苗根、茎长度和叶面积显著提高^[37-38]。张心青等^[39]研发具有溶磷、解钾的菌剂能够良好定植于土壤中,比对照提高土壤速效磷含量3倍以上。此外,微生物菌剂对土壤理化性质也有显著影响,可显著提高土壤有效磷含量和速效钾含量,并且复合菌株的添加比单一菌株在促生效果上更好^[40]。在本研究菌株B3和F6定植后,与对照组相比,火龙果的根长和鲜质量有显著提高,根长增加76.19%,鲜质量增加33.09%。这说明具有溶磷、解钾等能力的菌株对植物的生长具有一定的促进作用。本研究的相关性分析结果表明,土壤中速效钾的含量与火龙果的根长、鲜质量、干质量及氮磷钾养分的累积有显著相关,李莉婕等^[41]的研究结果也表明火龙果的养分累积与钾含量有一定的关系。为此推断本研究中火龙果鲜质量和干质量的增加可能是因为微生物促进了火龙果对钾元素的积累,加快了火龙果物质的合成和转运。

4 结论

通过溶磷、解钾、固氮、产IAA培养基在火龙果根际土壤中筛选出具有定向功能的加纳木霉(F6)和芽孢杆菌(B3),接种具有高效功能的F6和B3复合菌剂能够有效提高火龙果的生物量,增加火龙果的鲜质量、干质量、根长及根体积。改善土壤肥力,提高土壤有效磷、速效钾、有机质含量。本研究结果有助于火龙果专用有机肥的研发,丰富有机肥的微生物多样性。

参考文献:

- [1] 王彩霞, 谢良商, 卢丽兰, 等. 海南省主栽红心火龙果品种营养成分分析比较[J]. 热带农业科学, 2018, 38(3): 53-56.
- [2] 高曼, 甘祖于, 王维, 等. 红肉火龙果营养价值及产品研究发现[J]. 贵州农机化, 2022(1): 16-20.
- [3] 应姗姗. 火龙果皮中果胶提取及改性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [4] 松华. 火龙果飘洋过海来看你[J]. 花木盆景(花卉园艺), 2003(7): 24.
- [5] STÉPHANE HACQUARD, RUBEN GARRIDO-OTER, ANTONIO GONZÁLEZ, et al. Microbiota and host nutrition across plant and animal kingdoms[J]. Cell Host Microbe, 2015, 17(5): 603-616.
- [6] 黄文茂, 易伦, 彭思云, 等. PGPR 复合菌剂对辣椒生长及根际土壤微生物结构的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020(1): 195-201.
- [7] 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.
- [8] 张琪, 徐思琪, 赵学通, 等. 核桃专用溶磷、解钾、促生长高效功能微生物的筛选与复配[J]. 中国农学通报, 2020, 36(34): 64-70.
- [9] LIU S T, LEE L Y, TAI C Y, et al. Cloning of an *Erwinia herbicola* gene necessary for gluconic acid production and enhanced mineral phosphate solubilization in *Escherichia coli* HB101: nucleotide sequence and probable involvement in biosynthesis of the coenzyme pyrroloquinoline quinone [J]. Journal of Bacteriology, 1992, 174: 5814-5819.
- [10] BABU-KHAN S, YEO T C, MARTIN W L, et al. Cloning of a mineral phosphate-solubilizing gene from *Pseudomonas cepacia* [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1995, 61: 972-978.
- [11] NAILA I, YINGJIE Y, CHENGSHENG Z, et al. Temporal dynamics and variation in the alfalfa root nodule and rhizosphere microbial communities of coastal sand and lawn soil[J]. Journal of Plant Interactions, 2022, 17(1): 173-182.
- [12] 王瑾, 李小坤, 鲁剑巍, 等. 小分子有机酸和阳离子对含钾矿物钾素释放的影响[J]. 华中农业大学学报, 2013, 32(3): 67-71.
- [13] 黄群策, 陈启锋, 李志真. 生物固氮研究的前景[J]. 科技导报, 1999, 17(1): 26-29.
- [14] 刘小玉. 根际促生菌株的筛选及其复合微生物肥料的研制与肥效研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
- [15] 梁和钦, 李富山, 张翰君, 等. 复合微生物有机肥在红心火龙果上的施用效果试验[J]. 安徽农学通报, 2018, 24(1): 54-56.
- [16] MAB KHALIL RAHAD, M ASHRAFUL ISLAM, M ABDUR RAHIM, et al. Effects of rooting media and varieties on rooting performance of dragon fruit cuttings (*Hylocereu sundatus* Haw.) [J]. Research in Agriculture Livestock and Fisheries, 2016, 3(1): 67-77.
- [17] PRATIBHA R, ANITA S, DEEPTI S, et al. Improvement of phosphorus uptake, phosphorus use efficiency, and grain yield of upland rice (*Oryza sativa* L.) in response to phosphate-solubilizing bacteria blended with phosphorus fertilizer [J]. Pedosphere, 2022, 32(5): 752-763.
- [18] 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.
- [19] 陈弟, 李可增, 吴琼, 等. 火龙果根际土壤微生物 2 种 DNA 提取方法的比较[J]. 热带生物学报, 2019, 10(2): 184-189.
- [20] 徐晓燕, 马毅杰. 土壤矿物钾的释放及其在植物营养中的意义[J]. 土壤通报, 2001, 32(4): 173-176.
- [21] 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.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-270.
- [23] 张勇, 李多川. 耐热真菌五个中国新记录种[J]. 菌物学报, 2013, 32(1): 142-149.
- [24] 李坤, 洪秀杰, 王欣悦, 等. 贝莱斯芽孢杆菌 TC-52 的分离鉴定及其对水稻幼苗生长和立枯病的影响[J]. 江苏农业科学, 2023: 1-9. [http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1214.S.20231213.1647.002.html.]
- [25] 刘悦, 徐伟慧, 王志刚. 大豆根际促生菌的筛选鉴定与促生效应[J]. 浙江农业学报, 2023, 35(12): 2775-2784.
- [26] 陈多菲, 徐畅, 刘文佳, 等. 3株水稻根际促生菌的筛选鉴定及促生作用研究[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(24): 196-202.
- [27] 董晓雪, 彭国袁, 常卓凡, 等. 西藏土壤芽孢杆菌的分离鉴定及生防促生菌筛选[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(23): 114-123.
- [28] 危潇, 黎妍妍, 姚经武, 等. 哈茨木霉 WF2 菌株鉴定及对烟草黑胫病的防效[J]. 中南农业科技, 2023, 44(11): 12-15.
- [29] 陆妍吉, 滕菲, 姜姝, 等. 2种土壤微生物产 IAA 能力和促生功能的测定[J]. 安徽农学通报, 2022, 28(1): 22-23.
- [30] 杨军, 刘承武, 李霞, 等. 豆科植物-微生物共生固氮研究进展[J]. 植物生理学报, 2023, 59(8): 1407-1435.
- [31] 周丽秀. 黄河三角洲滨海盐碱地固氮和复合微生物菌剂制备和应用[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2024: 4-8.
- [32] 赵欣, 王怡霏, 王嘉嘉, 等. 木霉菌对作物及土壤生态环境的影响[J]. 中国农业科技导报, 2023, 25(11): 166-172.
- [33] 伍巧慧, 龚文坤, 刘新月, 等. 哈密瓜根际耐高温促生菌的筛选及其促生效应研究[J]. 中国土壤与肥料, 2023(11): 221-228.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 刘子瑶, 张思源, 丁万博, 等. 贝莱斯芽孢杆菌 LXS-N2 的

- 功能特性及抑菌机理初探[J]. 吉林农业大学学报: 1-10 [2024-5-13]. <https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2023.20100>.
- [37] 江红梅, 殷中伟, 史发超, 等. 一株耐盐溶磷真菌的筛选、鉴定及其生物肥料的应用效果[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(3): 728-742.
- [38] 段俊英, 韩静淑, 柴明, 等. 植物根际固氮微生物的研究从芒果(*Mangifera indica* Linn)和小麦(*Triticum aestivum*L.)根系分离的两株固氮菌的分类学研究[J]. 微生物学杂志, 1982(3): 16-26.
- [39] 张心青, 田杰伟, 马娜娜, 等. 一种高效溶磷解钾微生物菌剂的筛选及应用研究[J]. 天津农业科学, 2022, 28(8): 8-13.
- [40] 王俊铎, 郑巨云, 龚照龙, 等. 微生物菌剂对土壤理化性质及棉花生长的影响[J]. 新疆农垦科技, 2023, 46(5): 65-68.
- [41] 李莉婕, 赵泽英, 王虎, 等. 钾肥施用量对中低肥力果园火龙果养分吸收和产质量的影响[J]. 贵州农业科学, 2022, 50 (4): 8-14.

Screening of microorganisms promoting rhizosphere growth in dragon fruit

GONG Wenkun, WU Qiaohui, WANG Gang, YANG Jinming, LÜ Rongting, WANG Beibei
(School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China)

Abstract: A strain of *Trichoderma* and a strain of *Bacillus* were screened from the rhizosphere soil of dragon fruit (*Hylocereus undulatus* Britt. & Rose) using nitrogen fixation, phosphorus solubilization, potassium solubilization, and IAA production media. The growth promoting effect of their fermentation broth on dragon fruit was determined through pot experiments. The results showed that strains F6 (*Trichoderma ghanense*) and B3 (*Bacillus velezensis*) were screened from the rhizosphere soil of dragon fruit, which had the ability to dissolve phosphorus and potassium, fix nitrogen, and produce IAA. Among them, F6 had the highest ability to fix nitrogen and produce IAA, while B3 had the highest ability to dissolve phosphorus and potassium. Inoculation with microbial agents significantly improved the agronomic traits of dragon fruit. The combined microbial agents (B3+F6) had the most significant effect, increasing the fresh weight by 33.09% and the dry weight by 23.11%. Inoculation with microbial agents can improve soil fertility, significantly increase the contents of available phosphorus, available potassium, and organic matter in the soil. Compared with CK treatment, inoculation with a single strain B3 or F6 increased the available phosphorus content by 14.49% and 9.9%, the available potassium content by 10.4% and 16.47%, and the alkaline nitrogen content by 25.85% and 14.35%, respectively, whereas the inoculation of the mixed strains B3+F6 increased the contents of available phosphorus, available potassium, and organic matter by 37.02%, 12.64%, and 16.77%, respectively. Correlation analysis between soil physicochemical properties and growth promoting indicators of dragon fruit shows that under the inoculation with the combined microbial agents the content of soil available potassium is significantly positively correlated with the fresh weight and dry weight of dragon fruit above ground, as well as the accumulation of nitrogen, phosphorus, and potassium in dragon fruit. It can hence be concluded that inoculation with the combined microbial agents (B3+F6) has a significant improvement effect on the fresh and dry weight of the above ground parts of dragon fruit, as well as the root system of dragon fruit. The combined microbial agents have a synergistic effect on the accumulation of nutritional elements, nitrogen, phosphorus and potassium, in dragon fruit, and also has the effect of improving soil fertility.

Keywords: dragon fruit; promoting microorganisms; phosphorus solubilization; nitrogen fixation; potassium solubilization