

# 产紫蓝状菌解磷条件的优化及对辣椒生长与品质的影响

徐云龙<sup>1</sup>, 周游<sup>1</sup>, 郭立佳<sup>1</sup>, 汪军<sup>1</sup>, 梁昌聪<sup>1</sup>, 杨扬<sup>1</sup>, 他永全<sup>1</sup>, 韩丙军<sup>2\*</sup>, 杨腊英<sup>1\*</sup>

- 1 中国热带农业科学院环境与植物保护研究所, 热带作物生物育种全国重点实验室, 农业农村部热带作物有害生物综合治理重点实验室, 国家肥料微生物种质资源库(海南), 海南省热带农业微生物菌种资源库, 海南 海口
- 2 中国热带农业科学院分析测试中心, 农业农村部亚热带果品蔬菜质量安全控制重点实验室, 海南 海口

徐云龙, 周游, 郭立佳, 汪军, 梁昌聪, 杨扬, 他永全, 韩丙军, 杨腊英. 产紫蓝状菌解磷条件的优化及对辣椒生长与品质的影响[J]. 微生物学报, 2025, 65(5): 2175-2189.

XU Yunlong, ZHOU You, GUO Lijia, WANG Jun, LIANG Changcong, YANG Yang, TA Yongquan, HAN Bingjun, YANG Laying. Optimization of culture conditions for phosphorus solubilization of *Talaromyces purpureogenus* with effects of promoting the growth and improving the quality of red cluster pepper[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2025, 65(5): 2175-2189.

**摘要:**【目的】从玉米根际土壤中筛选出一株对磷酸三钙与植酸钙均有较好的解磷效果的解磷真菌——产紫蓝状菌(*Talaromyces purpureogenus*), 并命名为 XZY3PSF。为了后续将该菌株应用于农业生产, 开展其解磷条件优化及对辣椒生长与品质影响的研究。【方法】采用液体摇培法测定溶液中有效磷含量, 研究该菌株对  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 、 $\text{FePO}_4$ 、 $\text{AlPO}_4$ 、磷矿粉、大豆卵磷脂及鸡蛋黄等 6 种难溶性磷酸盐的溶解能力, 并探讨碳源、氮源、pH、装液量等因素对其解磷能力的影响; 采用温室盆栽法评价该菌株对辣椒的促生作用及对果实品质的影响。【结果】该菌株对碳源的利用顺序依次为果糖>葡萄糖>麦芽糖>蔗糖; 对氮源的利用顺序依次为氯化铵>硝酸铵>硫酸铵>硝酸钾>脲。菌株在初始 pH 6.0–7.0 的条件下解磷能力较强, 不同装液量对菌株的解磷能力无显著性影响。在供试的 6 种磷源培养液中, 该菌株对磷酸三钙和磷矿粉的解磷量最高。其中, 磷酸三钙在第 5 天达到最高解磷量, 且极显著高于其他磷源( $P<0.01$ ); 磷矿粉则在第 21 天达到最高解磷量, 且极显著高于其他磷源( $P<0.01$ )。与施用复合化肥相比, 该菌株可显著提高辣椒苗的株高、辣椒产量、辣椒维生素 C 含量与辣椒素类物质总量( $P<0.05$ )。Pearson 相关性分析结果表明, 菌株

资助项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(1630042022010, 1630042024002); 中国热带农业科学院国家热带农业科学中心科技创新团队项目(CATASCXTD202312)

This work was supported by the Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (1630042022010, 1630042024002) and the Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences for Science and Technology Innovation Team of National Tropical Agricultural Science Center (CATASCXTD202312).

\*Corresponding authors. E-mail: HAN Bingjun, hanbjun@163.com; YANG Laying, layingyang@catas.cn

Received: 2024-12-06; Accepted: 2024-12-22; Published online: 2025-03-04

XZY3PSF 在不同氮源或不同碳源的培养液中的解磷量与 pH 变化呈极显著负相关关系, 与菌丝干重呈显著或极显著负相关关系; 辣椒素类物质含量与维生素 C 含量、糖度之间分别呈极显著与显著正相关关系。【结论】菌株 XZY3PSF 解磷能力强, 尤其对磷酸铝与磷酸铁类磷源也具有一定的解磷能力, 能显著提高作物的主要营养指标, 推测其在南方砖红土壤中将具有较强的解磷能力, 为后续田间应用奠定良好基础。

关键词: 产紫篮状菌; 条件优化; 辣椒; 促生作用; 品质

## Optimization of culture conditions for phosphorus solubilization of *Talaromyces purpureogenus* with effects of promoting the growth and improving the quality of red cluster pepper

XU Yunlong<sup>1</sup>, ZHOU You<sup>1</sup>, GUO Lijia<sup>1</sup>, WANG Jun<sup>1</sup>, LIANG Changcong<sup>1</sup>, YANG Yang<sup>1</sup>,  
TA Yongquan<sup>1</sup>, HAN Bingjun<sup>2\*</sup>, YANG Laying<sup>1\*</sup>

1 Environment and Plant Protection Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, National Key Laboratory for Tropical Crop Breeding, Key Laboratory of Integrated Pest Management on Tropical Crops, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Collection of Microbial Resource for Fertilizer (Hainan), Collection of Tropical Agricultural Microbial Resource in Hainan Province, Haikou, Hainan, China

2 Analysis and Test Center, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Key Laboratory of Quality and Safety Control for Subtropical Fruit and Vegetable, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Haikou, Hainan, China

**Abstract: [Objective]** A *Talaromyces purpureogenus* strain with solubilizing effects on tricalcium phosphate and calcium phytate was screened from the rhizosphere soil of maize and named XZY3PSF. To promote the application of this strain in serving agricultural production, we optimized the culture conditions for phosphorus solubilization of this strain and studied the effects of this strain on the growth and quality of red cluster pepper. **[Methods]** We evaluated the solubilizing effects of strain XZY3PSF on  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ,  $\text{FePO}_4$ ,  $\text{AlPO}_4$ , phosphate rock powder, soybean lecithin, and egg yolk by measuring the available phosphorus content in the solution after liquid shaking culture. The effects of carbon source, nitrogen source, pH, and liquid loading volume on the phosphorus solubilization of this strain were studied. Pot experiments were carried out in a greenhouse to evaluate the effects of this strain on the growth and fruit quality of red cluster pepper. **[Results]** The carbon sources used by the strain were in an order of fructose>glucose>maltose>sucrose, and the nitrogen sources followed an order of ammonium chloride>ammonium nitrate>ammonium sulfate>potassium nitrate>urea. The phosphorus-solubilizing ability of the strain was higher under the condition of initial pH 6.0–7.0, and it was not affected by the liquid loading volume. The strain achieved higher phosphorus solubilization with tricalcium phosphate and phosphate rock powder as the phosphorus sources. With tricalcium phosphate as the phosphorus source, the strain showed the highest phosphorus solubilization on days 5, which was

higher than that with other phosphorus sources ( $P<0.01$ ). With phosphate rock powder as the phosphorus source, the strain showed the highest phosphorus solubilization on days 21 ( $P<0.01$ ). Compared with the application of compound fertilizer, the inoculation of this strain increased the plant height, yield, vitamin C content, and total capsaicinoid content of red cluster pepper ( $P<0.05$ ). The results of Pearson correlation analysis showed that the phosphorus solubilization of strain XZY3PSF in the culture medium with different nitrogen or carbon sources was negatively correlated with pH and the dry weight of mycelia. The capsaicinoid content was positively correlated with vitamin C and sugar content of pepper fruits. **[Conclusion]** Strain XZY3PSF has a strong ability to solubilize phosphorus, especially aluminum phosphate and iron phosphate, while improving the main nutritional indicators of crops. It is hypothesized that the strain will have a strong ability to solubilize phosphorus in the laterite soil in southern China. These findings lay a foundation for subsequent application of this strain in the field.

**Keywords:** *Talaromyces purpureogenus*; condition optimization; red cluster pepper; plant growth-promoting effects; quality

磷是植物生长和发育过程中不可或缺的元素, 它参与了许多生物大分子的合成, 如核酸、蛋白质和抗性物质, 对植物的光合作用、呼吸作用及生物合成过程具有重要影响<sup>[1]</sup>。然而, 土壤中的磷元素存在形态复杂, 难以被植物直接吸收利用, 绝大多数磷元素都以不能被植物吸收利用的有机磷和难溶性的无机磷酸盐沉淀(如磷酸钙盐等)形式存在<sup>[2-3]</sup>, 而可以被植物吸收利用的磷酸盐极为缺乏。土壤中可供植物利用的游离磷浓度平均仅为 $-1\ \mu\text{mol/L}$ 或更低, 很少高于 $10\ \mu\text{mol/L}$ , 远低于植物组织中的磷含量( $5\text{--}20\ \text{mmol/L}$ )<sup>[4]</sup>, 且可溶性磷酸盐在土壤中的迁移率很低, 导致植物对游离磷的利用率极低。

有机磷虽然只约占土壤磷元素总量的 $15\%\text{--}18\%$ , 但在磷的生物地球化学循环中扮演着重要角色, 主要包括土壤有机质中的有机磷、生物体内的有机磷(如磷酸肌醇、核酸、磷脂等)及与腐殖质结合的某些有机磷; 土壤中的有机磷在微生物的作用下, 通过矿化作用转化为无机磷, 供植物吸收利用; 无机磷通常占土壤总磷含量的 $60\%\text{--}80\%$ , 包括吸附态磷、矿物态磷和水溶性磷, 主要以正磷酸盐的形式存在于钙、镁、铁、铝及黏粒结合的磷中; 在土壤无机磷

化合物中, 除了少量的水溶态磷外, 绝大部分以吸附态和固体矿物态存在; 这些难溶性无机磷在酸性土壤中与 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 形成难溶性化合物, 在中性条件下与 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 形成易溶性化合物, 而在碱性条件下则与 $\text{Ca}^{2+}$ 形成难溶性化合物<sup>[5-6]</sup>。

解磷菌(phosphate-solubilizing microorganisms, PSM)是一类能够分解有机或无机磷物质的微生物, 种类繁多, 已报道的解磷菌有20多个属, 包括细菌、真菌和放线菌等<sup>[7]</sup>。在土壤微生物总量中, 解磷放线菌数量占 $15\%\text{--}45\%$ , 解磷细菌数量占 $1\%\text{--}60\%$ , 而解磷真菌数量仅占 $0.1\%\text{--}0.5\%$ <sup>[8]</sup>。目前报道的解磷细菌较多, 包括沙门氏菌属、产碱菌属、假单胞菌属、芽孢杆菌属等; 解磷放线菌有欧链霉菌、小单孢菌等; 解磷真菌有青霉属、丛枝菌根(arbuscular mycorrhiza, AM)、曲霉属、根霉属等, 解磷真菌的种类和数量较少; 有些蓝细菌也具有解磷功能, 如繁育拟惠氏蓝细菌和鱼腥藻等<sup>[8]</sup>。尽管解磷细菌在土壤中数量最多, 但从解磷能力来看, 真菌往往更为高效, 且解磷真菌具有更稳定的遗传特性<sup>[9]</sup>。解磷菌通过分泌有机酸、质子、多糖、酶等物质, 将难溶性磷转化为植物可吸收利用的无机磷酸盐, 从而改善土壤磷素供应,

提高植物吸收磷素的效率<sup>[10]</sup>。此外,解磷菌不仅能为植物根部周围提供磷素资源,还能分泌植物生长激素等特殊物质,促进植物根系对磷素的吸收、转化和利用,这种作用有助于植物在缺磷环境下保持正常生长和发育,对于提高土壤肥力、促进植物生长具有重要意义<sup>[11]</sup>。

本研究对前期筛选获得的解磷真菌 XZY3 PSF<sup>[12]</sup>进行了解磷条件的优化并研究其对辣椒生长与品质的影响,旨在为后续田间应用奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

#### 1.1.1 菌株

菌株 XZY3PSF 分离自西藏自治区墨脱县背崩乡(29°14'36"N, 95°10'9"E)的玉米根际土壤样品,并经鉴定为 *Talaromyces purpureogenus*, 保藏于广东省微生物菌种保藏中心,保藏编号为 GDMCC 62750。

#### 1.1.2 培养基

简化版无机磷液体培养基(g/L): 葡萄糖 10.0, 硫酸铵 2.0, 磷酸三钙 5.0, 胰蛋白胨 0.5, pH 7.0–7.5; 保存用 PDA 培养基(g/L): 马铃薯 200.0, 葡萄糖 20.0, 琼脂 18.0, pH 自然。所有培养基均在 121 °C 条件下灭菌 20 min。

#### 1.1.3 供试溶液

钼酸盐溶液: 将 13.00 g 钼酸铵  $[(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}]$  溶于 100 mL 蒸馏水中, 0.35 g 酒石酸锑钾  $(\text{KSbC}_4\text{H}_4\text{O}_7\cdot \text{H}_2\text{O})$  溶于 100 mL 蒸馏水中。在不断搅拌的情况下, 将钼酸铵溶液缓慢加入 300 mL 50% 硫酸溶液中, 再加入酒石酸锑钾溶液混匀, 置于棕色瓶 4 °C 保存。10% 抗坏血酸溶液: 将 10 g 抗坏血酸溶于 100 mL 蒸馏水中, 置于棕色瓶 4 °C 保存。150 mmol/L 对硝基苯磷酸二钠(*p*-disodium 4-nitrophenyl phosphate, pNPP)溶液: 称取 2.784 g pNPP 溶于 50 mL 蒸馏水中。

### 1.2 孢子接种液制备方法

挑取菌株的菌丝, 接种于 PDA 平板中, 28 °C 恒温培养至长出孢子。用无菌水冲洗孢子, 并经无菌 3 层擦镜纸过滤后, 制备成真菌的孢子悬液, 经镜检孢子数约为  $7\times 10^6$  个孢子/mL。

### 1.3 菌株解磷能力的测定

#### 1.3.1 不同碳源对解磷菌生长及解磷能力的影响试验

以简化版无机磷液体培养基为基础, 分别以半乳糖、海藻糖、阿拉伯糖、可溶性淀粉、蔗糖、麦芽糖、葡萄糖、果糖为碳源, 其他成分保持不变。各碳源添加量: 海藻糖 10.50 g/L, 葡萄糖、半乳糖、果糖、阿拉伯糖 10.00 g/L, 蔗糖、麦芽糖 9.50 g/L, 可溶性淀粉 9.00 g/L, 使每个处理中的碳(C)含量一致。在 150 mL 三角瓶中分别装入 50 mL 各培养液, 121 °C 条件下灭菌 20 min, 接菌后于 28 °C、170 r/min 摇床培养 7 d, 测定各培养液的可溶性磷浓度、pH 及菌丝干重。

#### 1.3.2 不同氮源对解磷菌生长及解磷能力的影响试验

以简化版无机磷液体培养基为基础, 分别以  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 $\text{NH}_4\text{Cl}$ 、 $\text{KNO}_3$ 、 $\text{NH}_4\text{NO}_3$ 、脲  $[\text{CO}(\text{NH}_2)_2]$  作为氮源, 其他成分保持不变。各氮源添加量分别为  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  0.50 g/L、 $\text{NH}_4\text{Cl}$  0.41 g/L、 $\text{KNO}_3$  0.76 g/L、 $\text{NH}_4\text{NO}_3$  0.30 g/L、脲 0.23 g/L, 使每个处理的氮(N)含量一致。在 150 mL 三角瓶中装入 50 mL 各培养液, 28 °C、170 r/min 培养 7 d, 测定各培养液的可溶性磷浓度、pH 及菌丝干重。

#### 1.3.3 解磷菌对 6 种难溶性磷源的溶解能力及溶解动态测定

以简化版无机磷液体培养基为基础, 分别加入磷酸三钙、磷矿粉、磷酸铁、磷酸铝、大豆卵磷脂、鸡蛋黄液作为磷源。在 150 mL 三角瓶中装入 50 mL 基础营养液, 各磷源加入量均为每瓶 0.25 g。各培养基中磷(P)元素加入量分

别为磷酸三钙 1 000.00 mg/L、磷矿粉 506.00 mg/L、磷酸铝 1 270.00 mg/L、磷酸铁 830.00 mg/L、大豆卵磷脂 476.49 mg/L、鸡蛋黄液 13.30 mg/L。分别于第 5、9、15、21、30 天测定可溶性磷浓度。

### 1.3.4 不同初始 pH 对解磷菌生长及解磷能力的影响试验

以简化版无机磷液体培养基为基础, 用 HCl 和 NaOH 将培养基分别调至 pH 4.0、5.0、6.0、7.0、8.0、9.0、10.0。在 150 mL 三角瓶中分别装入 50 mL 各培养液, 28 °C、180 r/min 培养 7 d, 测定各培养液的可溶性磷浓度、pH 及菌丝干重。

### 1.3.5 不同装液量对解磷菌生长及解磷能力的影响试验

配制简化版无机磷液体培养基, 分别在 100、150、250 mL 三角瓶中装入 50 mL 培养液, 121 °C 灭菌 20 min。接菌后于 28 °C、180 r/min 摇床培养 7 d, 测定各培养液的可溶性磷浓度、pH 及菌丝干重。

### 1.3.6 摇培方法

除装液量外, 其余实验均在 150 mL 三角瓶中装入 50 mL 培养液, 121 °C 灭菌 20 min。接菌后于 28 °C、180 r/min 摇床培养, 于相应测定时间取上清液测定可溶性磷浓度。各实验中的每个处理设 3 次重复。

### 1.3.7 测定方法

pH 值用台式 pH 计(Thermofisher 公司)直接测定。培养液可溶性磷浓度用钼锑抗比色法测定<sup>[13]</sup>。解磷能力为接菌培养液的有效磷浓度减去未接菌培养液的有效磷浓度, 取 3 次重复的平均值, 以 mg/L 表示。菌丝干重为过滤菌丝, 用稀盐酸溶液溶解未分解的磷酸三钙粉末, 然后用蒸馏水反复冲洗, 40 °C 低温烘干至恒重, 以 g 表示。

## 1.4 解磷菌对室内盆栽辣椒苗生长及果实品质的影响

### 1.4.1 辣椒种植与处理方法

取香蕉种植地土壤作为盆栽用土(土壤 pH 为 6.0, 有机质含量为 58.5 g/kg, 碱解氮为 89.30 mg/kg, 有效磷含量为 95.58 mg/kg, 速效钾为 329.7 mg/kg)。以终浓度 1 g/kg 将磷酸三钙混入土壤中, 设置以下处理: 土壤中接入解磷菌、未接入解磷菌(该处理作为对照)以及施用 N/P/K=15/15/15 的复合化肥。将活化好的菌株配制成孢子悬液, 并保证菌悬液浓度达到  $10^6$  CFU/mL。将朝天椒种子用椰糠育苗, 培养至有 5 片真叶以上后移植至花盆中。每个花盆(规格 500 mm×210 mm×150 mm)中移栽一株辣椒苗, 定植培养 7 d 后, 分别浇灌 100 mL 自来水、100 mL 菌悬液、100 mL 自来水加入 2 g 复合化肥。之后在整个试验过程中, 不再施加任何肥料, 仅根据植株干燥情况适当补充水分。每种处理方式各设 3 组平行。

### 1.4.2 植株生物量的测定

植株培养约 2 个月, 收获果实 5 批次以上后, 将整株植株从土壤中取出, 用清水冲洗干净泥沙, 再用滤纸吸干水分。用直尺测量株高, 用游标卡尺测量植株基部的茎粗。将根和茎分离后, 用电子天平分别称量其质量, 并取平均值。产量统计为同一植株不同批次摘取的充分红熟的红椒果实总量, 用电子天平称量其质量并分别取平均值。

### 1.4.3 辣椒果实的品质测定内容与测定方法

采收充分红熟且无病虫害的红椒果实, 经 80 °C 热风烘干至恒重, 去掉果柄后粉碎, 分别过 40 目和 80 目筛, 并保存于避光的干燥器内。用于测定干物质、维生素 C、糖含量、蛋白质和辣椒素共 5 个品质指标, 设 3 次重复, 取平均值。干物质含量采用烘干法测定, 维生素 C 含量采用 2,6-二氯酚靛酚法测定<sup>[14]</sup>, 蛋白质含量采用考马斯亮蓝 G-250 法测定, 可溶性总糖含量

采用蒽酮比色法测定<sup>[15]</sup>, 辣椒素含量采用高效液相色谱仪(Agilent 公司)测定。测定方法参照中华人民共和国国家标准《辣椒及辣椒制品中辣椒素类物质测定及辣度表示方法》(GB/T 21266—2007)<sup>[16]</sup>并稍作修改, 具体方法: 称取样品 2 g, 用甲醇 40 mL 分 2 次提取, 取提取液用水定容至 50 mL, 随后取提取液 1 mL, 用甲醇稀释至 10 mL 后上机测定, 流动相为水:甲醇=35:65。

## 1.5 数据处理与分析

采用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 对数据进行分析处理。多重比较采用 LSD 法, 相关性分析采用 Pearson 法, 利用 Excel 2010 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 菌株解磷能力的测定

#### 2.1.1 不同碳源对解磷菌生长及解磷能力的影响

菌株 XZY3PSF 在不同碳源的无机磷液体培养液中培养 7 d 后, 分别测定其有效磷含量、菌丝干重及培养后液体的 pH 值。从表 1 可知, 有效磷含量最高 3 种碳源为果糖、葡萄糖和麦芽糖, 均高于 350.0 mg/L。其中, 果糖最高, 达

529.4 mg/L; 其次为葡萄糖, 达 447.1 mg/L。三者之间无显著性差异, 但果糖与麦芽糖之间存在显著性差异, 有效磷含量最低的为半乳糖, 仅为 0.7 mg/L, 与其他碳源之间存在极显著性差异。菌丝干重最高的 3 种碳源为可溶性淀粉、麦芽糖和蔗糖, 均高于 0.160 g, 但相互之间无显著性差异, 半乳糖和海藻糖的菌丝干重最低, 均为 0.021 g, 与其他碳源之间存在极显著性差异。培养后液体的 pH 值在 4.84–8.11 之间, 半乳糖处理下 pH 值最高, 呈碱性; 其余碳源处理下 pH 均呈酸性, 其中麦芽糖处理下 pH 值最低, 为 4.84, 与其他碳源之间存在极显著性差异。

如图 1 所示, 菌株 XZY3PSF 在不同碳源培养液中的有效磷含量与菌丝干重及培养液终 pH 值之间呈极显著负相关关系。

#### 2.1.2 不同氮源对解磷菌生长及解磷能力的影响

菌株 XZY3PSF 在不同氮源的无机磷液体培养液中摇培养 7 d 后, 分别测定其有效磷含量、菌丝干重及培养后液体的 pH 值。从表 2 可知,  $\text{NH}_4\text{Cl}$  和  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  处理下的有效磷含量较高, 分别为 594.9 mg/L 和 567.2 mg/L, 二者之间无显著性差异。有效磷含量最低的为脲处理, 为

**表1 菌株XZY3PSF在不同碳源的磷酸三钙培养液中的有效磷含量、菌丝干重与培养液终pH值比较分析结果**

**Table 1 Comparative analysis of available phosphorus content, dry weight of mycelium and final pH value of culture solution of strain XZY3PSF cultured in tricalcium phosphate culture solution with different carbon sources**

| Carbon sources | Available phosphorus content (mg/L) | Dry weight of mycelium (g) | Final pH value of culture solution |
|----------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| Galactose      | 0.7±0.1Ee                           | 0.021±0.002Bc              | 8.11±0.07Aa                        |
| Trehalose      | 14.2±3.2Dd                          | 0.021±0.001Bc              | 6.70±0.14Bb                        |
| Arabinose      | 16.6±3.0Dd                          | 0.092±0.008Ab              | 6.17±0.05BCc                       |
| Soluble starch | 59.1±1.2Cc                          | 0.111±0.005Aab             | 6.35±0.06Bbc                       |
| Sucrose        | 353.4±8.1Bb                         | 0.179±0.012Aab             | 5.32±0.74DEde                      |
| Maltose        | 390.0±10.3ABb                       | 0.181±0.017Aab             | 4.84±0.23Ee                        |
| Glucose        | 447.1±15.7ABab                      | 0.157±0.007Aab             | 5.62±0.03CDd                       |
| Fructose       | 529.4±3.9Aa                         | 0.153±0.016Aab             | 5.54±0.04CDd                       |

There is a extremely significant difference between different uppercase letters ( $P<0.01$ ), and there is a significant difference between different lowercase letters ( $P<0.05$ ). The same as the following tables.

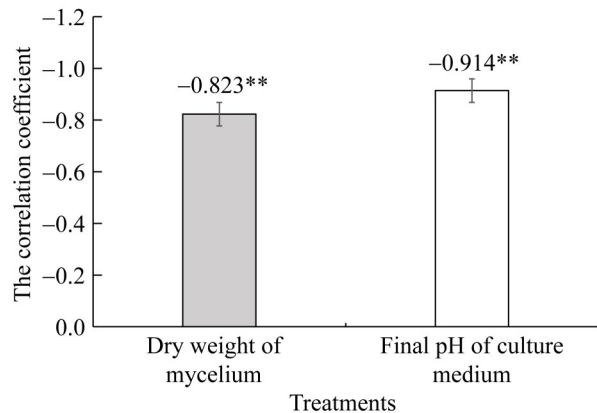


图1 菌株XZY3PSF在不同碳源下培养后溶液中的有效磷含量与菌丝干重、培养液终pH值之间的Pearson相关性分析结果。\*:  $P<0.05$ ; \*\*:  $P<0.01$ 。下同。

Figure 1 Pearson correlation analysis results between available phosphorus content in the solution of strain XZY3PSF cultured under different carbon sources and dry weight of mycelium and final pH value of the culture medium. \*:  $P<0.05$ ; \*\*:  $P<0.01$ . The same below.

表2 菌株XZY3PSF在不同氮源的磷酸三钙培养液中培养后溶液中的有效磷含量、菌丝干重与培养液终pH值比较分析结果

Table 2 Comparative analysis results of available phosphorus content, dry weight of mycelium and final pH value of culture solution of strain XZY3PSF cultured in tricalcium phosphate culture solution with different nitrogen sources

| Nitrogen sources                                | Available phosphorus content (mg/L) | Dry weight of mycelium (g) | Final pH value of culture solution |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| NH <sub>4</sub> Cl                              | 594.9±32.3Aa                        | 0.107±0.054a               | 4.71±0.52Bb                        |
| NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>                 | 567.2±12.6Aa                        | 0.104±0.041a               | 4.74±0.50Bb                        |
| (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 481.9±4.4Bb                         | 0.169±0.002a               | 5.57±0.11ABa                       |
| KNO <sub>3</sub>                                | 382.2±16.1Cc                        | 0.168±0.035a               | 6.12±0.18Aa                        |
| CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>               | 353.5±2.2Cd                         | 0.145±0.015a               | 5.49±0.50ABa                       |

353.5 mg/L, 与其他氮源处理之间存在极显著性差异; 不同氮源处理下的菌丝干重范围为 0.104–0.169 g, 相互之间无显著性差异; 各处理

培养后 pH 值在 4.71–6.12 之间, KNO<sub>3</sub> 处理下 pH 值最高、NH<sub>4</sub>Cl 处理下 pH 值最低, 二者之间存在极显著性差异, 而 KNO<sub>3</sub> 与 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、脲之间无显著性差异, 但三者与 NH<sub>4</sub>Cl、NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 之间存在极显著性差异。

如图 2 所示, 菌株 XZY3PSF 在不同氮源培养液中的有效磷含量与菌丝干重呈显著负相关, 与培养液终 pH 值的变化之间呈极显著负相关关系。

### 2.1.3 不同初始 pH 对解磷菌生长及解磷能力的影响

菌株 XZY3PSF 在不同初始 pH 的无机磷液体培养液中培养 7 d 后, 分别测定其有效磷含量、菌丝干重及培养后液体的 pH 值。如表 3 所示, 随着初始 pH 的增加, 有效磷含量整体呈现先增加后降低的趋势, 在 pH 6.0–7.0 时达到最大值, 分别为 504.5 mg/L 和 484.6 mg/L, 二者之间无显著性差异。当初始 pH 为 9.0 时, 有效磷含量最低, 为 437.6 mg/L。菌丝干重在不同初始 pH 处理下整体无显著性差异, 但在 pH 7.0 时

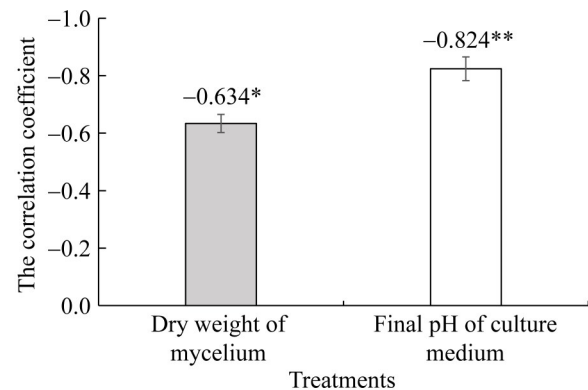


图2 菌株XZY3PSF在不同氮源的磷酸三钙培养液中培养后溶液中的有效磷含量、菌丝干重、培养液终pH值之间的Pearson相关性分析结果

Figure 2 Pearson correlation analysis results of available phosphorus content in solution, dry weight of mycelium and final pH value of culture medium after XZY3PSF was cultured in tricalcium phosphate culture medium with different nitrogen sources.

**表3** 菌株XZY3PSF在不同初始pH的磷酸三钙培养液中培养后溶液中的有效磷含量、菌丝干重与培养液终pH值的比较分析结果

Table 3 Comparative analysis results of available phosphorus content, dry weight of mycelium and final pH value of culture solution of strain XZY3PSF cultured in tricalcium phosphate culture solution with different initial pH values

| Initial pH | Available phosphorus content (mg/L) | Dry weight of mycelium (g) | Final pH value of culture solution |
|------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| 4.0        | 462.1±13.8BCbc                      | 0.126±0.015a               | 5.65±0.13Aa                        |
| 5.0        | 456.8±7.0BCbc                       | 0.121±0.004ab              | 5.63±0.02Aa                        |
| 6.0        | 504.5±8.0Aa                         | 0.113±0.002ab              | 5.38±0.11ABb                       |
| 7.0        | 484.6±7.5ABab                       | 0.110±0.009b               | 5.25±0.15Bb                        |
| 8.0        | 459.4±6.8BCbc                       | 0.121±0.004ab              | 5.31±0.02Bb                        |
| 9.0        | 437.6±10.1Cc                        | 0.113±0.005ab              | 5.29±0.14Bb                        |

相对较低, 为 0.110 g, 与其余各处理(除 pH 4.0)之间无显著性差异。培养后液体的 pH 值整体范围在 5.0–6.0 之间, 初始 pH 4.0–6.0 的处理间无极显著性差异, 但 pH 6.0 处理与 pH 4.0 处理之间存在显著性差异。初始 pH 6.0–9.0 的处理间无显著性差异。

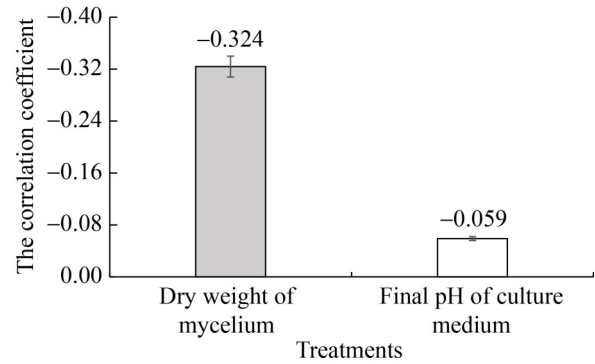
如图 3 所示, 菌株 XZY3PSF 在不同初始 pH 的培养液中, 有效磷含量与菌丝干重及培养液终 pH 值之间均无显著相关性。

#### 2.1.4 不同装液量对解磷菌生长及解磷能力

菌株 XZY3PSF 在不同装液量的无机磷液体培养液中培养 7 d 后, 分别测定其有效磷含量、菌丝干重及培养后液体的 pH 值。如表 4 所示, 在 3 种装液量处理下, 培养液中的有效磷含量、菌丝干重以及培养液终 pH 值之间均无显著性差异。如图 4 所示, 有效磷含量与菌丝干重及培养液终 pH 值之间无显著相关性。

#### 2.1.5 解磷菌对 6 种难溶性磷源的溶解能力及溶解动态测定

如表 5 所示, 菌株 XZY3PSF 在供试的 6 种磷源培养液中, 最高解磷量出现在磷酸三钙和



**图3** 菌株XZY3PSF在不同初始pH的磷酸三钙培养液中培养后溶液中的有效磷含量与菌丝干重、培养液终pH值之间的Pearson相关性分析结果

Figure 3 Pearson correlation analysis results of available phosphorus content in solution, dry weight of mycelium and final pH value of culture medium after XZY3PSF was cultured in tricalcium phosphate culture medium with different initial pH.

**表4** 菌株XZY3PSF在不同装液量的磷酸三钙培养液中培养后溶液中的有效磷含量、菌丝干重与培养液终pH值的比较分析结果

Table 4 Comparative analysis results of available phosphorus content, dry weight of mycelium and final pH value of culture solution of strain XZY3PSF cultured in tricalcium phosphate culture solution with different liquid volumes

| Broth content | Available phosphorus content (mg/L) | Dry weight of mycelium (g) | Final pH value of culture solution |
|---------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| 50 mL/250 mL  | 417.7±6.2a                          | 0.111±0.012a               | 6.96±0.14a                         |
| 50 mL/150 mL  | 414.2±19.9a                         | 0.112±0.006a               | 6.84±0.03a                         |
| 50 mL/100 mL  | 430.2±4.4a                          | 0.123±0.009a               | 6.89±0.12a                         |

磷矿粉处理中。磷酸钙在第 5 天达到最高解磷量(416.7 mg/L), 且极显著高于其他磷源, 随后解磷量随时间增加逐渐降低; 磷矿粉和磷酸铝均在第 21 天达到最高解磷量, 分别为 604.5 mg/L 和 146.0 mg/L, 且极显著高于其他磷源; 磷酸铁在第 21 天达到最高解磷量(25.0 mg/L), 但与其

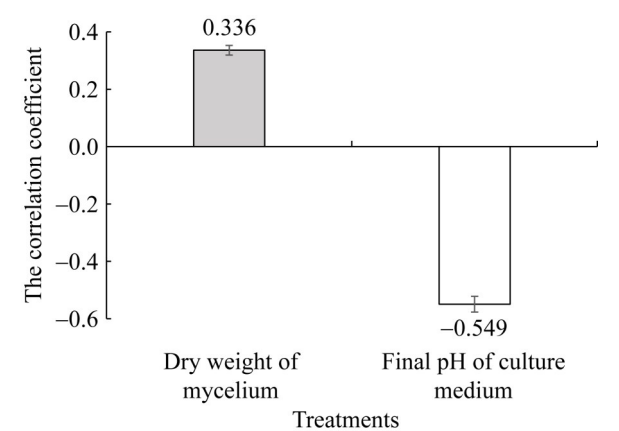


图4 菌株XZY3PSF在不同装液量的磷酸三钙培养液中培养后溶液中的有效磷含量与菌丝干重、培养液终pH值之间的Pearson相关性分析结果

Figure 4 The results of Pearson correlation analysis between available phosphorus content in solution dry weight of mycelium, and final pH value of culture medium after strain XZY3PSF was cultured in tricalcium phosphate medium with different liquid volumes.

他磷源之间无显著性差异；大豆卵磷脂和鸡蛋黄液处理均在第30天达到最高解磷量，分别为100.2 mg/L和9.9 mg/L。其中，大豆卵磷脂处理的解磷量在第5天、第9天和第15天极显著低于第30天，而鸡蛋黄液处理的解磷量极显著高于其他磷源(表5、图5)。

表5 菌株XZY3PSF对不同磷源在不同培养时间下的有效磷含量的差异性比较分析结果

Table 5 Comparative analysis of availablephosphorus content of different phosphorus sources at different culture times by strain XZY3PSF

| Different phosphorus sources | Available phosphorus content (mg/L) |                   |                 |                 |                 |
|------------------------------|-------------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                              | 5 d                                 | 9 d               | 15 d            | 21 d            | 30 d            |
| Calcium phosphate            | 416.7±5.4Aa/Aa                      | 241.0±8.4Aa/Bb    | 120.9±16.3Bb/Cc | 66.1±9.1Cd/CDd  | 19.4±2.7Ccd/Dd  |
| Ground phosphate rock        | 222.0±8.7Bb/Cc                      | 248.1±14.1Aa/BCbc | 278.3±10.1Aa/Bb | 604.5±31.1Aa/Aa | 595.5±12.1Aa/Aa |
| Aluminum phosphate           | 123.0±3.9Cc/Bb                      | 76.9±4.0Bb/Dd     | 95.9±5.7Bc/Cc   | 146.0±7.0Bb/Aa  | 102.2±4.6Bb/Cc  |
| Iron phosphate               | 20.3±2.6Dd/Aab                      | 18.5±1.6Cc/Ab     | 18.9±2.7De/Ab   | 25.0±2.8De/Aa   | 23.1±7.1Ccd/Aab |
| Soy lecithin                 | 13.8±1.9Dd/Dd                       | 35.5±2.9BCc/Cc    | 52.9±4.0Cd/Bb   | 94.5±11.4Cc/Aa  | 100.2±5.0Bb/Aa  |
| Egg yolk liquid              | 0.1±0.0Ee/Cc                        | 4.0±1.4Cc/Bb      | 4.6±1.0De/Bb    | 4.2±0.3De/Bb    | 9.9±1.9Cd/Aa    |

The uppercase and lowercase letters before/represent the difference analysis results among values in the same column, while those after/represent the difference analysis results betweenamong values in the same row.

2.2 解磷菌对室内盆栽的辣椒苗生长及果实品质影响

2.2.1 对辣椒苗生长的影响

如图6所示，除单果重量外，株高、植株总重、根干重和产量上在复合化肥和菌株XZY3PSF处理下均显著高于CK处理。其中菌株XZY3PSF处理下的株高、植株总重和产量最高，分别比CK处理增加了60.9%、162.2%和78.4%。在株高和产量方面，菌株XZY3PSF处理显著高于复合化肥处理。

2.2.2 对辣椒品质的影响

如图7所示，与CK处理相比，菌株XZY3PSF处理的辣椒在糖含量、可溶性蛋白含量和维生素C含量方面均显著高于CK处理，增幅分别为58.9%、35.9%和169.9%；在干物质含量方面，3种处理间无显著性差异。复合化肥和菌株XZY3PSF处理下的辣椒糖含量、可溶性蛋白含量和维生素C含量均显著高于CK处理，且菌株XZY3PSF处理下的维生素C含量极显著高于复合化肥处理。

从表6可知，菌株XZY3PSF处理下的辣椒中辣椒碱、二氢辣椒素、辣椒素类物质总量和辣度均极显著高于CK和复合化肥处理，相对CK处理的增幅分别为113.7%、68.9%、104.3%和104.5%。

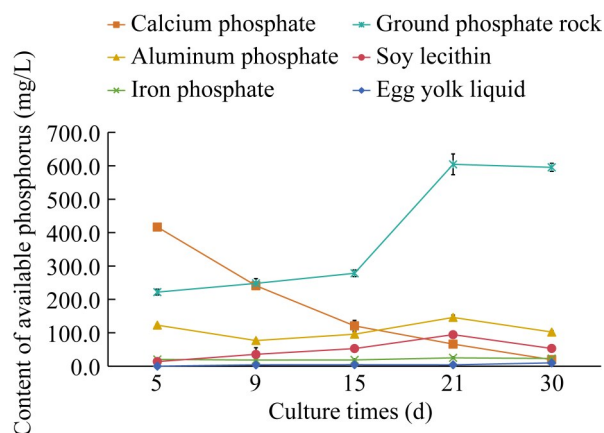


图5 菌株XZY3PSF对不同磷源在不同培养时间下的有效磷含量变化趋势

Figure 5 Change trend of available phosphorus content of strain XZY3PSF under different phosphorus sources and culture times.

如图 8 所示, 通过相关分析研究干物质含量、糖含量、可溶性蛋白含量和维生素 C 含量与辣椒碱、二氢辣椒素、辣椒素类物质总量和

辣度之间的相关性。结果显示, 干物质含量和可溶性蛋白含量与辣椒碱、二氢辣椒素、辣椒素类物质总量和辣度均无显著相关性; 糖含量与辣椒碱、二氢辣椒素、辣椒素类物质总量和辣度均呈现出显著正相关关系。

### 3 讨论与结论

根际微生物作为土壤和植株之间的连接体, 在土壤与植株的物质和能量循环中发挥着至关重要的作用<sup>[17-18]</sup>。现代农业中磷肥的大量施用使得能被农作物吸收的磷素超标, 反而会诱发土壤缺磷。这是因为施用后过量的磷会与锌结合, 生成磷酸锌, 导致作物无法有效吸收锌, 从而出现缺锌症状<sup>[9]</sup>。解磷菌可将难溶性磷矿盐转化为可被植物吸收利用的有效磷, 既能提高土壤的有效磷含量, 减少环境污染, 还能有效提高植物的抗逆能力<sup>[10,19]</sup>。本研究中筛选出的产紫篮状菌(*Talaromyces purpureogenus*) XZY3PSF

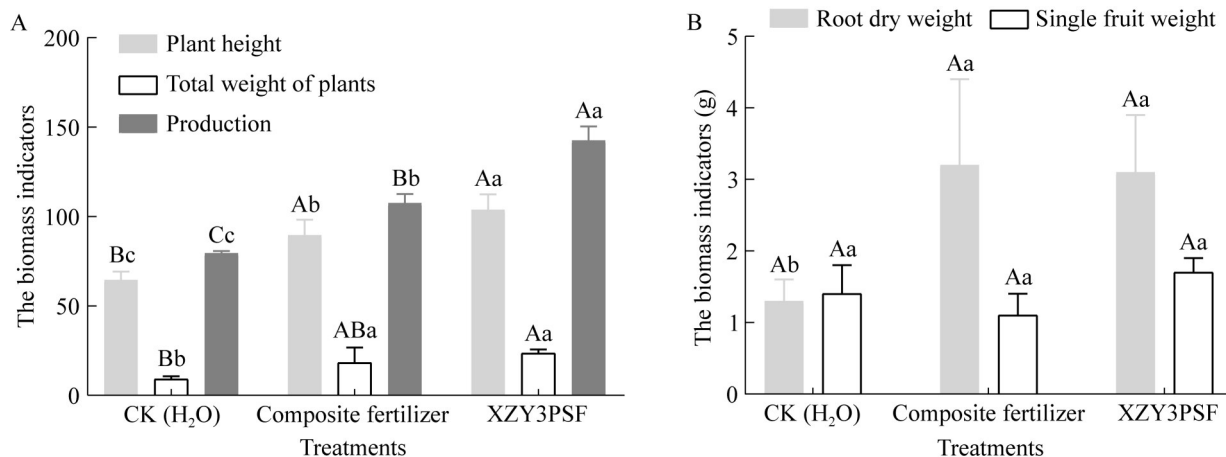


图6 室内盆栽种植的辣椒植株株高、根重与产量的比较分析结果。A: 株高、植株总重与产量的比较分析; B: 根干重与单果的比较分析。图中不同大小写字母表示存在极显著( $P<0.01$ )或显著性差异( $P<0.05$ )。下同。

Figure 6 Comparative analysis of plant height, root weight, and yield of pepper plants grown in pots indoors. A: Comparative analysis of plant height, total plant weight, and production; B: Comparative analysis of root dry weight and single fruit weight. In the figure, there is a extremely significant difference between different uppercase letters ( $P<0.01$ ), and there is a significant difference between different lowercase letters ( $P<0.05$ ). The same below.

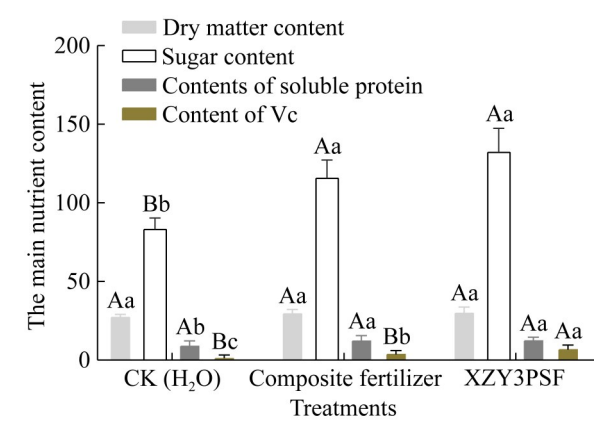


图7 室内盆栽种植收获的辣椒主要营养物质含量的比较分析结果

Figure 7 Comparative analysis of the main nutrient contents of peppers harvested from indoor potted planting.

菌株在液体培养条件下展现出良好的解磷能力，对磷酸三钙的溶解率在 41%–60%。该结果与史发超等<sup>[20]</sup>分离筛选的斜卧青霉菌 (*Penicillium decumbens*)对磷酸三钙的溶解率相似或略高，但低于赖鉴添等<sup>[21]</sup>分离筛选的泡盛曲霉(*Aspergillus awamori*)对磷酸三钙的溶解率。在盆栽土壤中，该菌株对作物生长的促进作用与上述研究结果一致。

碳是构成微生物的基本骨架，解磷微生物同样需要碳源来合成新的细胞，并参与体内碳化合物的氧化<sup>[22]</sup>，因此碳被认为是影响微生物解磷作用的主要因素。研究表明，培养基中碳源和氮源会影响解磷菌的生长，并通过改变其产生的有机酸类型和浓度影响解磷效果。在本

研究中，XZY3PSF 菌株对半乳糖、海藻糖、阿拉伯糖、可溶性淀粉利用率较低，而对蔗糖、麦芽糖、葡萄糖、果糖的利用率较高，这可能与培养液终 pH 值有关。难以利用的碳源其终 pH 值在 6.15 以上，而利用率高且解磷效果好的碳源其终 pH 值均在 5.65 以下。同时，研究发现菌株 XZY3PSF 在以葡萄糖和果糖为碳源时具有最大的解磷量，二者之间无显著性差异。葡萄糖处理下培养后溶液中的有效磷含量为 447.1 mg/L，是蔗糖处理下的 1.3 倍。这一结果与洋葱伯克氏菌 (*Burkholderia cepacia*)<sup>[23-24]</sup>、粘质沙雷氏菌 (*S. marcescens*)<sup>[25]</sup>、巨大芽孢杆菌<sup>[26]</sup>以及菌株 PS-3<sup>[27]</sup>的研究结果一致，均表明以葡萄糖为碳源时解磷能力较好。关于解磷微生物对氮源的研究较多，但主要集中在氨态氮和硝态氮的利用上。Seshadri 等<sup>[28]</sup>发现，黑曲霉 (*Aspergillus niger*)在以 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 为氮源时，生物量最大且解磷效果最好，该结果与本研究一致。此外，张泽等<sup>[29]</sup>和 Nautiyal 等<sup>[30]</sup>的研究均发现，铵盐比其他氮源更能有效地溶解磷，推测其原因可能是 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>的质子释放降低了培养基的 pH 值，从而促进了磷的溶解。在本研究中，不同氮源处理中有效磷含量最高的均为铵盐。李静等<sup>[31]</sup>指出，微生物代谢会使培养介质的 pH 值下降，因此微生物的解磷量与 pH 值之间并不存在显著的相关性。本研究中菌株 XZY3PSF 在不同初始 pH 的培养液中，有效磷含量与 pH 值的变化之间也无显著相关关系，这间接佐证了本研究结果的可靠性。Fan 等<sup>[32]</sup>的研究中，BISR-HY65 菌株的最适初始 pH 6.0–8.0。本研究中初始 pH

表6 室内盆栽种植收获的辣椒辣度相关数据的比较分析结果

Table 6 Comparative analysis of data related to the spiciness of peppers harvested from indoor potted planting

| Treatment             | Capsaicin (g/kg) | Dihydrocapsaicin (g/kg) | Total amount of capsaicinoids (g/kg) | Spicy degree |
|-----------------------|------------------|-------------------------|--------------------------------------|--------------|
| CK (H <sub>2</sub> O) | 1.396±0.227Bb    | 0.367±0.069Bb           | 1.959±0.244Bb                        | 201±26Bc     |
| Composite fertilizer  | 1.747±0.203Bb    | 0.443±0.043ABb          | 2.434±0.269Bb                        | 250±26Bb     |
| XZY3PSF               | 2.983±0.358Aa    | 0.620±0.119Aa           | 4.003±0.510Aa                        | 411±54Aa     |

Different uppercase letters indicate highly significant differences between each other ( $P<0.01$ ), while different lowercase letters indicate significant differences between each other ( $P<0.05$ ).

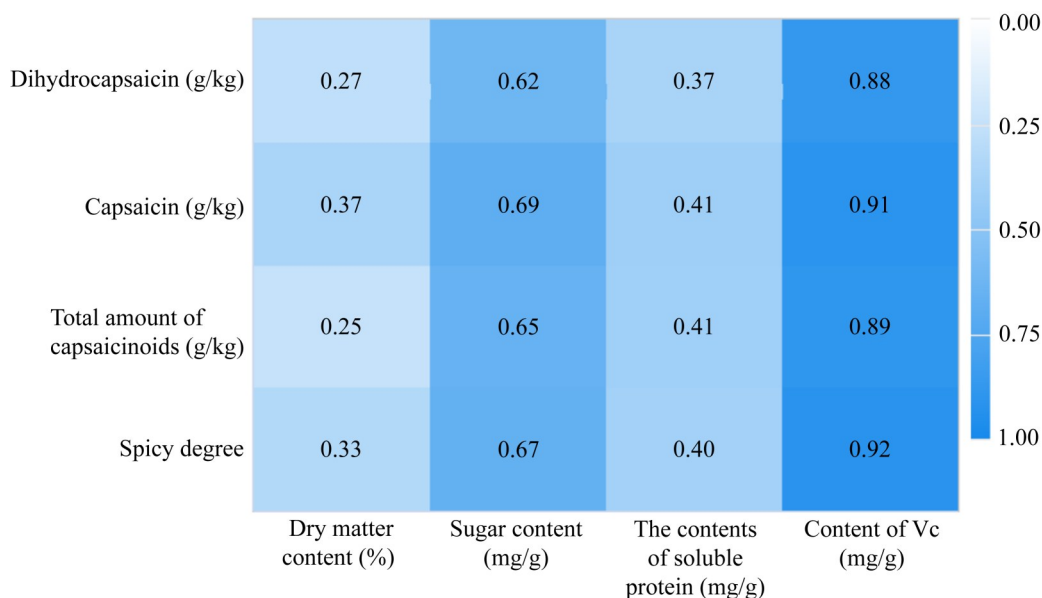


图8 辣椒营养物质含量与辣味素等辣度相关指标之间的Pearson相关性结果

Figure 8 Pearson correlation results between pepper nutrient content and spicity related indicators such as capsaicin.

值为 6.0 时, 菌株在溶液中的有效磷含量最高, 达 504.5 mg/L。杨晓燕等<sup>[33]</sup>研究发现, 巨大芽孢杆菌能够有效降解有机磷和无机磷, 对卵磷脂中的磷分解后有效磷含量最高为 1.67 mg/L。本研究中菌株 XZY3PSF 对大豆卵磷脂中的磷降解率最高达 94.5 mg/L。此外, 菌株 XZY3PSF 对磷矿粉、磷酸铝与磷酸铁类磷源也具有一定的解磷能力, 且其对磷矿粉的解磷能力随着培养时间的延长而增强。贾萌萌等<sup>[5]</sup>报道, 酸性土壤中主要为  $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$  态形成的难溶性磷化合物, 而南方砖红呈酸性, 推测菌株 XZY3PSF 在以磷矿粉等矿源废渣肥料化利用以及在提高南方砖红土壤中磷的有效利用方面具有较好的应用前景。

辣椒富含辣椒素、维生素 C、辣椒碱等, 是重要的蔬菜之一, 具有很高的营养价值和保健功能<sup>[34]</sup>。其中, 辣椒碱还具有抗菌消炎、降低胆固醇等功效<sup>[35]</sup>。付文婷等<sup>[36]</sup>对 10 份地方辣椒的 6 个营养成分间相关性进行分析, 发现部分性状显著相关, 总体来看, 维生素 C 与粗脂肪、

辣椒素呈显著正相关, 粗脂肪与辣椒素呈显著正相关。本研究中菌株处理下能显著提高作物的主要营养指标, 其中维生素 C 含量与二氢辣椒素、辣椒碱、辣椒素类物质总量、辣度之间均呈极显著正相关关系, 与付文婷等<sup>[33]</sup>的研究结果一致。李凌凌等<sup>[37]</sup>研究发现, 以固氮菌株和解磷真菌产紫篮状菌混合发酵所制复合型菌肥对辣椒苗的促生效果最佳, Kharkwal 等<sup>[38]</sup>研究发现, 经 *T. albobiverticillius* HNB9 定殖的植株生长增强, 表现为茎长和根长增加。本研究中菌株 XZY3PSF 处理下与 CK 及复合化肥处理相比, 株高与产量均为最高, 增幅分别为 60.9% 和 78.4%, 显著提高了辣椒的生物量。

总体而言, 菌株 XZY3PSF 在碳源为葡萄糖/果糖, 氮源为  $\text{NH}_4\text{NO}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$ , 初始 pH 值为 6.0/7.0 时, 解磷效率最高。此外, 对于不同磷源物质, 该菌株对磷酸三钙与磷矿粉的解磷能力最强。在促进辣椒生长的试验中, 菌株 XZY3PSF 能显著提高辣椒的生物量及主要营养指标。推测其在南方砖红土壤中将具有较强的

解磷能力, 具有开发成微生物菌肥的良好潜力, 研究结果为后续田间应用奠定了良好基础。

## 作者贡献声明

徐云龙: 本论文的主要实验参与者与撰写者; 周游: 试验方案设计及指导, 参与部分稿件修改; 郭立佳: 试验设计及开展; 汪军: 参与试验数据收集; 梁昌聪: 试验方案设计及指导; 杨扬: 试验方案指导, 论文修改及审核; 他永全: 试验指导; 韩丙军: 参与与辣味相关成分的分析与论文修改; 杨腊英: 整体实验完成人。

## 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] 吴紫燕, 糜芳, 干华磊, 张莹莹, 袁东华, 吴家胜, 毛伟力. 一株具有促生溶磷功能的木霉菌 Tr940 的筛选及其在番茄上的应用[J]. 生物灾害科学, 2022, 45(2): 156-164.  
WU ZY, MI F, GAN HL, ZHANG YY, YUAN DH, WU JS, MAO WL. Screening of a *Trichoderma* Tr940 with the function of promoting growth and phosphorus-solubilizing as well as its application in tomatoes[J]. Biological Disaster Science, 2022, 45(2): 156-164 (in Chinese).
- [2] TURRIÓN MB, BUEIS T, LAFUENTE F, LÓPEZ O, SAN JOSÉ E, ELEFTHERIADIS A, MULAS R. Effects on soil phosphorus dynamics of municipal solid waste compost addition to a burnt and unburnt forest soil[J]. Science of the Total Environment, 2018, 642: 374-382.
- [3] 陈凯. 低磷胁迫下山白兰幼苗的生理响应及差异蛋白表达分析[D]. 南宁: 广西大学硕士学位论文, 2020.  
CHEN K. Physiological response and differential protein expression analysis of seedlings of *Cymbidium glaucum* under low phosphorus stress[D]. Nanning: Master's Thesis of Guangxi University, 2020 (in Chinese).
- [4] YANG XJ, FINNEGAN PM. Regulation of phosphate starvation responses in higher plants[J]. Annals of Botany, 2010, 105(4): 513-526.
- [5] 贾萌萌, 刘国明, 黄标. 设施菜地利用强度对土壤磷形态分布及其有效性的影响: 以江苏省水耕人为土和潮湿锥形土为例[J]. 土壤, 2021, 53(1): 30-36.  
JIA MM, LIU GM, HUANG B. Effects of greenhouse vegetable cultivation on fractionations and bioavailability of soil phosphorus: a case study on paddy soil and fluvo-aquic soil in Jiangsu Province[J]. Soils, 2021, 53(1): 30-36 (in Chinese).
- [6] POIRIER Y, BUCHER M. Phosphate transport and homeostasis in *Arabidopsis*[J]. The Arabidopsis Book, 2002, 1: e0024.
- [7] 乔欢, 吴小芹, 魏伟. 两株解磷青霉对马尾松根际土壤的微生态效应及其促生作用[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2016, 40(6): 109-116.  
QIAO H, WU XQ, WEI W. Effects of two phosphate-solubilizing *Penicillium* strains on microbial community structure and their growth-promoting in *Masson pine* rhizosphere[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2016, 40(6): 109-116 (in Chinese).
- [8] 李敏, 滕泽栋, 朱静, 宋明阳. 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.  
LI M, TENG ZD, ZHU J, SONG MY. Research advances in heavy metal contaminated soil remediation by phosphate solubilizing microorganisms[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(10): 3393-3402 (in Chinese).
- [9] 荣国强, 秦欣科, 姚全军, 张自清, 胡应邦, 吴长昊. 土壤解磷菌在现代农业中应用现状的研究[J]. 农产品加工, 2021(13): 86-89.  
RONG GQ, QIN XK, YAO QJ, ZHANG ZQ, HU YB, WU CH. Research on application status of soil phosphate solubilizing bacteria in modern agriculture[J]. Farm Products Processing, 2021(13): 86-89 (in Chinese).
- [10] 彭静静, 高辉远. 解磷菌的研究进展及展望[J]. 泰山学院学报, 2016, 38(6): 95-99.  
PENG JJ, GAO HY. Research progress and prospect of phosphate-solubilizing microorganisms[J]. Journal of Taishan University, 2016, 38(6): 95-99 (in Chinese).
- [11] 张典利, 孟臻, 亓文哲, 乔康. 植物根际促生菌的研究与应用现状[J]. 世界农药, 2018, 40(6): 37-43, 50.  
ZHANG DL, MENG Z, QI WZ, QIAO K. The research and application status of plant growth promoting rhizobacteria[J]. World Pesticide, 2018, 40(6): 37-43, 50 (in Chinese).
- [12] 杨腊英, 郭立佳, 周游, 汪军, 梁昌聪, 徐云龙, 黄俊生. 多功能解磷真菌的筛选与解磷活性评价[J]. 热带作物学报, 2023, 44(8): 1662-1670.  
YANG LY, GUO LJ, ZHOU Y, WANG J, LIANG CC, XU YL, HUANG JS. Screening of a multifunctional phosphate-solubilizing fungus and evaluation of the phosphate-solubilizing activity[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2023, 44(8): 1662-1670 (in Chinese).
- [13] 陈玮. 钼锑抗比色法测定水中总磷的改进[J]. 山西化工, 2003(1): 18-19, 36.  
CHEN W. Improvement of determining total phosphorus by colormetry[J]. Shanxi Chemical Industry, 2003(1): 18-19, 36 (in Chinese).
- [14] 徐朝阳. 2, 6-二氯酚靛酚滴定法与碘量法测定蔬菜水果中维生素 C 方法的准确度比较[J]. 食品安全导刊, 2021(25): 100-101.  
XU CY. Comparison of accuracy between 2, 6-dichlorophenol indophenol titration method and iodometric method for determining vitamin C in vegetables and fruits[J]. China Food Safety Magazine, 2021(25): 100-101 (in Chinese).
- [15] 焦洁. 考马斯亮蓝 G-250 染色法测定苜蓿中可溶性蛋白

- 含量[J]. 农业工程技术, 2016, 36(17): 33-34.
- JIAO J. Determination of soluble protein in alfalfa by coomassie brilliant blue G-250 staining method[J]. Agricultural Engineering Technology, 2016, 36(17): 33-34 (in Chinese).
- [16] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 辣椒及辣椒制品中辣椒素类物质测定及辣度表示方法: GB/T 21266—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Determination of total capsaicinoid content and representation of pungency degree in capsicum and its products: GB/T 21266—2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008 (in Chinese).
- [17] DONG HW, LIU W, ZHANG H, ZHENG XB, DUAN HJ, ZHOU LX, XU TT, RUAN R. Improvement of phosphate solubilizing bacteria *Paenibacillus xylanexedens* on the growth of *Chlorella pyrenoidosa* and wastewater treatment in attached cultivation[J]. Chemosphere, 2022, 306: 135604.
- [18] ALAM F, KHAN A, FAHAD S, NAWAZ S, AHMED N, ARIF ALI M, ADNAN M, DAWAR K, SAUD S, HASSAN S, AOWN SAMMAR RAZA M, NAVEED K, ARIF M, DATTA R, DANISH S. Phosphate solubilizing bacteria optimize wheat yield in mineral phosphorus applied alkaline soil[J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2022, 21(5): 339-348.
- [19] 田志杰, 李景鹏, 杨福. 非生物胁迫下作物磷素利用研究进展[J]. 生态学杂志, 2017, 36(8): 2336-2342.
- TIAN ZJ, LI JP, YANG F. Progress in crop phosphorus utilization under abiotic stresses[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(8): 2336-2342 (in Chinese).
- [20] 史发超, 殷中伟, 江红梅, 范丙全. 一株溶磷真菌筛选鉴定及其溶磷促生效果[J]. 微生物学报, 2014, 54(11): 1333-1343.
- SHI FC, YIN ZW, JIANG HM, FAN BQ. Screening, identification of P-dissolving fungus P83 strain and its effects on phosphate solubilization and plant growth promotion[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2014, 54(11): 1333-1343 (in Chinese).
- [21] 赖鉴添, 杨婷, 史发超, 和锐敏, 王鑫, 邵丹青, 何琴, 卢颖林, 胡黎明, 安玉兴. 蔗叶堆肥中一株泡盛曲霉溶磷能力的鉴定及其对辣椒的促生效果[J]. 微生物学报, 2021, 61(1): 77-91.
- LAI JT, YANG T, SHI FC, HE RM, WANG X, SHAO DQ, HE Q, LU YL, HU LM, AN YX. A phosphorus-dissolving *Aspergillus awamori* strain from sugarcane leaf compost for growth promotion of pepper[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2021, 61(1): 77-91 (in Chinese).
- [22] NAHAS E. Phosphate solubilizing microorganisms: effect of carbon, nitrogen, and phosphorus sources[M]// First International Meeting on Microbial Phosphate Solubilization. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007: 111-115.
- [23] SONG OR, LEE SJ, LEE YS, LEE SC, KIM KK, CHOI YL. Solubilization of insoluble inorganic phosphate by *Burkholderia cepacia* DA23 isolated from cultivated soil[J]. Brazilian Journal of Microbiology, 2008, 39(1): 151-156.
- [24] 黄达明, 李倩, 管国强, 张志才, 钱静亚, 宋庆春. 一株解磷细菌的筛选、鉴定及其溶磷培养条件的优化[J]. 生物技术通报, 2015(2): 173-178.
- HUANG DM, LI Q, GUAN GQ, ZHANG ZC, QIAN JY, SONG QC. Selection, identification and medium optimization of a phosphate-solubilizing bacterium[J]. Biotechnology Bulletin, 2015(2): 173-178 (in Chinese).
- [25] BEN FARHAT M, FARHAT A, BEJAR W, KAMMOUN R, BOUCHAALA K, FOURATI A, ANTOUN H, BEJAR S, CHOUAYEKH H. Characterization of the mineral phosphate solubilizing activity of *Serratia marcescens* CTM 50650 isolated from the phosphate mine of *Gafsa*[J]. Archives of Microbiology, 2009, 191(11): 815-824.
- [26] 卫星, 徐鲁荣, 张丹, 支月娥, 周培. 一株耐硝酸盐的巨大芽孢杆菌溶磷特性研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(7): 2052-2058.
- WEI X, XU LR, ZHANG D, ZHI YE, ZHOU P. Phosphate solubilizing characteristics of a nitrate-tolerating bacterium, *Bacillus megaterium*[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(7): 2052-2058 (in Chinese).
- [27] 韩蕾, 杨乐, 唐金铭, 张雅倩. 解磷菌发酵及溶磷条件的研究[J]. 生物技术通报, 2019, 35(1): 98-104.
- HAN L, YANG L, TANG JM, ZHANG YQ. Fermentation condition and phosphate-dissolving capacity of phosphate-solubilizing bacterium[J]. Biotechnology Bulletin, 2019, 35(1): 98-104 (in Chinese).
- [28] SESHADRI S, IGNACIMUTHU S, LAKSHMINARASIMHAN C. Effect of nitrogen and carbon sources on the inorganic phosphate solubilization by different *Aspergillus nigers* strains[J]. Chemical Engineering Communications, 2004, 191(8): 1043-1052.
- [29] 张泽, 李杏, 曾佳琦, 江昱燕, 耿惠怡, 葛艳辉. 溶磷菌的筛选、条件优化及溶磷机制研究[J/OL]. 天津理工大学学报, 2024. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1374.N.20240429.1832.046.html>.
- ZHANG Z, LI X, ZENG JQ, JIANG YY, GENG HY, GE YH. Screening of phosphate-solubilizing bacteria, optimization of conditions and study on phosphate-solubilizing mechanism[J/OL]. Journal of Tianjin University of Technology, 2024. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1374.N.20240429.1832.046.html> (in Chinese).
- [30] NAUTIYAL CS, BHADARIA S, KUMAR P, LAL H, MONDAL R, VERMA D. Stress induced phosphate solubilization in bacteria isolated from alkaline soils[J]. FEMS Microbiology Letters, 2000, 182(2): 291-296.
- [31] 李静, 艾加敏, 余天飞, 边丹, 郑超超, 郭旻皓, 邓振山. 一株溶磷真菌的鉴定及其促生特性研究[J]. 福建农业学报, 2021, 36(10): 1224-1230.
- LI J, AI JM, YU TF, BIAN D, ZHENG CC, GUO MH, DENG ZS. Identification and growth-promoting effect of a phosphate-solubilizing fungus on wheat seedlings[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2021, 36(10): 1224-1230 (in Chinese).
- [32] FAN DD, REN YX, ZHU XL, MA P, LIANG LH. Optimization of culture conditions for phosphate solubilizing by *Acinetobacter calcoaceticus* YC-5a using

- response surface methodology[J]. African Journal of Microbiology Research, 2011, 5(20): 3327-3333.
- [33] 杨晓燕, 叶伟伟, 魏善强, 张龙, 黄俊. 一株巨大芽孢杆菌发酵培养基的优化及解磷效果研究[J]. 中国农学通报, 2022, 38(15): 105-112.
- YANG XY, YE WW, WEI SQ, ZHANG L, HUANG J. *Bacillus megaterium*: fermentation medium optimization and phosphate solubilization effect[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(15): 105-112 (in Chinese).
- [34] 帅天罡, 陆红佳, 胡益侨, 刘雄. 辣椒营养保健功能与加工利用进展[J]. 中国调味品, 2014, 39(8): 125-129.
- SHUAI TG, LU HJ, HU YQ, LIU X. The nutrition and health care functions and processing and utilization progress of chili[J]. China Condiment, 2014, 39(8): 125-129 (in Chinese).
- [35] LOIZZO MR, PUGLIESE A, BONESI M, MENICHINI F, TUNDIS R. Evaluation of chemical profile and antioxidant activity of twenty cultivars from *Capsicum annuum*, *Capsicum baccatum*, *Capsicum chacoense* and *Capsicum chinense*: a comparison between fresh and processed peppers[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 64(2): 623-631.
- [36] 付文婷, 詹永发, 何建文, 黄冬福, 梁郸娜, 范高领, 杨万荣, 罗恒. 10个贵州地方辣椒品种品质评价[J]. 中国瓜菜, 2018, 31(12): 37-40.
- FU WT, ZHAN YF, HE JW, HUANG DF, LIANG DN, FAN GL, YANG WR, LUO H. Quality evaluation of 10 pepper landraces in Guizhou[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2018, 31(12): 37-40 (in Chinese).
- [37] 李凌凌, 陆雅琳, 汪汉正, 周予西, 左振宇, 杨忠华. 一株固氮菌的筛选、鉴定及混菌发酵制备复合型菌糠菌肥的研究[J]. 武汉科技大学学报, 2021, 44(1): 34-42.
- LI LL, LU YL, WANG HZ, ZHOU YX, ZUO ZY, YANG ZH. Isolation, identification of a nitrogen-fixing bacterium and preparation of complex bio-fertilizer with spent mushroom substrate by mix fermenting[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2021, 44(1): 34-42 (in Chinese).
- [38] KHARKWAL AC, JOSHI H, SHANDILYA C, DABRAL S, KUMAR N, VARMA A. Isolation and characterization of a newly discovered plant growth-promoting endophytic fungal strain from the genus *Talaromyces*[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 6022.