

接种根际促生菌对白花前胡根部品质与根际土壤磷、钾形态的影响

张 萌^{1,2}, 王逾涵¹, 刘振宇¹, 钟 彦¹, 郭冬琴^{3*}, 周 浓^{1,2*}

1. 重庆三峡学院生物与食品工程学院, 三峡库区道地药材绿色种植与深加工重庆市工程实验室, 重庆 万州 404120

2. 大理大学药学院, 云南 大理 671000

3. 重庆三峡医药高等专科学校药学院, 重庆 万州 404120

摘要: 目的 研究不同根际促生菌 (plant growth-promoting rhizobacteria, PGPR) 对白花前胡 *Peucedanum praeruptorum* 根际土壤中磷、钾元素含量、形态转变、元素有效性及其根部药用成分含量的影响, 为白花前胡的品质培优提供参考。方法 通过盆栽接种实验, 将 9 种不同类型 PGPR 菌株接种于白花前胡根际土壤, 试验设为空白对照 (CK)、接种 *Bacillus thuringiensis* (S1)、*Paenibacillus amylolyticus* (S2)、*B. polymyxa* (S3)、*B. aryabhattai* (S4)、*B. aryabhattai* (S5)、*B. cereus* (S6)、*B. mycoides* (S7)、*B. proteolyticus* (S8) 和 *B. wiedmannii* (S9) 10 个处理组; 共生培养 9 个月后, 测定根际土壤中不同形态磷、钾元素及根部白花前胡甲素、白花前胡乙素含量, 分析接种 PGPR 后白花前胡根部药用成分与根际土壤磷、钾形态含量的变化, 并通过相关性分析与通径分析探讨白花前胡有效成分与根际土壤磷、钾形态的相关性。结果 与 CK 组相比, 接种 PGPR 的 9 个处理组的白花前胡甲素、白花前胡乙素含量均显著提高, 且以 S2 组效果最为显著, 分别较 CK 组增长了 0.513%、0.649%; 接种不同 PGPR 均不同程度增加了白花前胡根际土壤有机磷、有效磷、全磷以及各形态无机磷含量, 其中以 S5 组效果最为显著; 接种 PGPR 可以提高白花前胡根际土壤全钾以及各形态钾素含量, 且以 S1 组效果最为显著; 相关性分析表明, 各形态无机磷呈极显著正相关, Fe-P、全磷与有效磷呈显著性正相关; 全钾、矿物钾、水溶钾均与速效钾呈极显著正相关, 缓效钾与速效钾呈显著性正相关, 各钾素形态之间呈极显著正相关。通径分析表明, Fe-P、缓效钾对白花前胡甲素呈正效应, 有机磷、Ca-P、有效磷、速效钾、交换钾对白花前胡乙素呈正效应。结论 接种不同 PGPR 能够有效提高白花前胡根际土壤各形态磷、钾素含量, 以及白花前胡品质和药用价值, 其中以 *Paenibacillus amylolyticus* 菌株接种效果最佳。

关键词: 根际促生菌; 白花前胡; 根际土壤; 白花前胡甲素; 白花前胡乙素; 品质

中图分类号: R286.2 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2025)03-0987-11

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2025.03.023

Effect of different plant growth-promoting *Rhizobacteria* on transition of phosphorus and potassium element in *Rhizosphere* soil and roots quality of *Peucedanum praeruptorum*

ZHANG Meng^{1,2}, WANG Yuhang¹, LIU Zhenyu¹, ZHONG Yan¹, GUO Dongqin³, ZHOU Nong^{1,2}

1. College of Food and Biological Engineering/Chongqing Engineering Laboratory for Green Cultivation and Deep Processing of Three Gorges Reservoir Area's Medicinal Herbs, Chongqing Three Gorges University, Wanzhou 404120, China

2. College of Pharmacy, Dali University, Dali 671000, China

3. College of Pharmacy, Chongqing Three Gorges Medical College, Wanzhou 404120, China

Abstract: Objectives To study the effect of different plant growth-promoting *Rhizobacteria* (PGPR) on the content, transformation, and availability of phosphorus and potassium in the rhizosphere soil of *Peucedanum praeruptorum*, as well as on the quality of its medicinal components, and to provide a reference for optimizing its cultivation. **Methods** *P. praeruptorum* was planted in pots and inoculated with nine different PGPR strains. The contents of various forms of phosphorus and potassium in the rhizosphere soil were measured. The experiment was set up as a control (CK), inoculated with *Bacillus thuringiensis* (S1),

收稿日期: 2024-06-25

基金项目: 重庆市教委科学技术研究计划项目 (KJQN202001205)

作者简介: 张 萌 (1997—), 硕士研究生, 主要从事药用植物栽培研究。E-mail: zm1832521139@163.com

*通信作者: 郭冬琴, 博士, 教授, 主要从事药用植物微生物资源研究。E-mail: guodongqin1997@163.com

周 浓, 博士, 教授, 主要从事中药资源与炮制研究。E-mail: erhaizn@126.com

Paenibacillus amylolyticus (S2), *B. polymyxa* (S3), *B. aryabhattai* (S4), *B. aryabhattai* (S5), *B. cereus* (S6), *B. mycoides* (S7), *B. proteolyticus* (S8), and *B. wiedmannii* (S9) ten treatment groups. After a year of inoculation, the transition between different types of phosphorus and potassium element in the rhizosphere soil as well as the contents of praeruptorin A and praeruptorin B in the roots of *P. praeruptorum* inoculated with PGPR were determined, and the correlation between medicinal ingredients and the forms of phosphorus and potassium element through correlation analysis and path analysis were discussed. **Results** Compared with CK group, the nine PGPR inoculation groups significantly increased the content of praeruptorin A and praeruptorin B, and the effect of S2 group was the most significant with the increase of praeruptorin A and praeruptorin B by 0.513% and 0.649% respectively. Inoculation with different PGPRs increased the contents of organic phosphorus, available phosphorus, total phosphorus, and various forms of inorganic phosphorus in the rhizosphere soil of *P. praeruptorum* in varying degrees, and the effect of S5 group was the most significant. Inoculation with PGPRs also increased the contents of total potassium and various types of potassium in the rhizosphere soil of *P. praeruptorum*, and the effect of S1 group is the most significant. The correlation analysis showed that there was a significant positive correlation between all forms of inorganic phosphorus, Fe-P, total phosphorus and available phosphorus. Total potassium, mineral potassium and water-soluble potassium were significantly positively correlated with available potassium, while slowly available potassium was significantly positively correlated with available potassium, and the correlation between different forms of potassium were also significantly positive. Path analysis showed that Fe-P and slowly available potassium had a positive effect on praeruptorin A, while organic phosphorus, Ca-P, available phosphorus, fast available potassium and exchangeable potassium had a positive effect on praeruptorin B. **Conclusions** Inoculation with different PGPRs can effectively improve the content of various forms of phosphorus and potassium in the rhizosphere soil of *P. praeruptorum*, as well as the quality and medicinal value of *P. praeruptorum*. Among the nine PGPRs, inoculation with *P. amylolyticus* strain was the most effective.

Key words: plant growth-promoting rhizobacteria; *Peucedanum praeruptorum* Dunn.; rhizosphere soil; praeruptorin A; praeruptorin B; quality

白花前胡 *Peucedanum praeruptorum* Dunn. 为伞形科前胡属多年生草本植物^[1], 主要分布于我国安徽的东南部、浙江的西北部、湖北的鄂西南地区、贵州的黔东南地区和铜仁地区等地^[2]。白花前胡主要以其根部入药, 具有降气化痰、疏散风热等作用^[1], 是太极急支糖浆、咳喘颗粒、杏苏止咳糖浆、咳喘顺气丸、气管炎丸、羚羊清肺丸、京制咳嗽痰喘丸等多种中成药的主要原材料^[3], 临床上常用于外感风热、痰热喘咳、风热咳嗽等症^[1]。相关研究表明^[4], 白花前胡含香豆素类、黄酮类、萜类及挥发油类等活性成分。随着医药产业发展, 白花前胡野生资源日益减少, 市场上目前应用的白花前胡药材多为人工栽培^[5]。然而, 现如今白花前胡年产量仅有 3 000 多 t, 这对于 4 000 t 左右的年需求量来说, 已出现较大的资源缺口^[3], 且普遍存在质量不稳定的品质问题^[6]。

根际促生菌 (plant growth-promoting *Rhizobacteria*, PGPR) 是指能够通过直接或间接作用来促进植物生长发育并依附于植物根际的一类有益菌群, 并通过其代谢活动和植物相互作用影响植物的生长发育, 包括分解、养分循环转化和大部分的土壤转化过程^[7]。常见的 PGPR 有芽孢杆菌属、固氮菌属、农杆菌属等, 其中芽孢杆菌属分布较为广泛^[8],

王丹等^[9]研究发现, 接种解钾菌可增加滇重楼叶面积, 并增强其叶片酶活性, 促进滇重楼叶片渗透调节物质的积累, 从而有效促进滇重楼的生长发育, 增强其抗逆性。江美彦等^[10]研究指出, 接种克雷伯氏菌可显著增加白芷株高、根长、产量等指标, 并显著提高其有效成分含量, 从而改善其品质。目前, 有关 PGPR 对药用植物的促生效应多以滇重楼^[11]、白芷^[10]等为主, 而有关 PGPR 对白花前胡的研究鲜见报道。因此, 本实验以白花前胡为研究对象, 测定接种 PGPR 后白花前胡根际土壤各形态钾、磷素及其根部药用成分含量, 探究 PGPR 对白花前胡根际土壤各形态钾、磷素及其根部品质的影响, 为培育高品质的白花前胡提供理论依据。

1 材料与仪器

1.1 仪器

UV-2450 型紫外可见分光光度计 (日本岛津集团), ME204E 型万分之一分析天平 (梅特勒-托利多仪器上海有限公司), HSY-26 型电热恒温水浴锅 (上海跃进医疗器械有限公司), TC-5-12 型马弗炉 (鹤壁市冶金设备有限公司), TDZ5-WS 型多管架自动平衡离心机 (湖南赛特湘仪离心机仪器有限公司), SB-5200DTN 型超声波清洗机 (宁波新芝生物科技股份有限公司), DZF-6050MBE 型电热恒温真

空干燥箱(上海博讯实业有限公司), LC-20AT 型高效液相色谱仪(日本 Shimadzu 公司)。

1.2 试剂

白花前胡甲素(批号 PS0422-0020)、白花前胡乙素(批号 PS0406-0020)对照品质量分数均 $\geq 98\%$ (成都普思生物科技有限公司);娃哈哈纯净水、三氯甲烷、甲醇(分析级)、甲醇(色谱级)、碳酸氢钠、盐酸、醋酸铵、冰醋酸、氨水、氟化铵、氢氧化钠、柠檬酸三钠、硫酸、氯化钠、硼酸、高氯酸、硝酸、连亚二硫酸钠、钼酸铵、酒石酸锶钾、抗坏血酸、2,6-二硝基酚、磷酸二氢钾,均为分析纯。

1.3 供试种子及菌种

白花前胡种子来源于万州区响水镇前胡种植基地人工种植生长良好的前胡健壮植株,种子采用单株保存并进行常规处理与管理,且经重庆三峡学院周浓教授鉴定为伞形科前胡属植物白花前胡 *P. praeruptorum* Dunn。栽培期间按照前胡植株室外栽培进行常规管理。实验所用供试菌株均为课题组前期分离培养具有较强解磷、解钾能力的优势菌种并活化,分别为根际土壤解钾菌^[12][苏云金芽孢杆菌 *Bacillus thuringiensis*(筛选自云南保山昌宁县 24°94'20.79"/99°56'52.25")、解淀粉芽孢杆菌 *Paenibacillus amylolyticus*(筛选自云南玉溪易门县 24°58'38.89"/102°12'52.17")、多粘芽孢杆菌 *B. polymyxa*(筛选自 24°94'20.79"/99°56'52.25")、解有机磷菌^[13][运动芽孢杆菌 *B. mycoides*(筛选自四川省会东县 26°23'32.68"/102°57'55.67")、蛋白水解芽孢杆菌 *B. proteolyticus*(筛选自云南丽江玉龙纳西族自治县 27°01'94.84"/100°22'01.55")、维德曼芽孢杆菌 *B. wiedmannii*(筛选自云南大理永平县 25°21'27.85"/99°23'14.09")、解无机磷菌^[13][阿氏芽孢杆菌 *B. aryabhattai*(筛选自四川省会东县 26°23'32.68"/102°57'55.67")、阿氏芽孢杆菌 *B. aryabhattai*(筛选自云南省保山蒲缥镇 25°02'09.58"/99°04'08.31")、蜡状芽孢杆菌 *B. cereus*(筛选自贵州龙里县 26°27'47.29"/106°59'33.64")] 的优势菌种。

2 方法

2.1 样品的处理

试验共设 9 个处理组(S1~S9)和 1 个对照组(栽培基质灭菌不施加菌肥,CK)。其中,S1 组接种菌株 *B. thuringiensis*、S2 组接种菌株 *Paenibacillus*

amylolyticus、S3 组接种菌株 *B. polymyxa*、S4 组接种菌株 *B. aryabhattai*、S5 组接种菌株 *B. aryabhattai*、S6 组接种菌株 *B. cereus*、S7 组接种菌株 *B. mycoides*、S8 组接种菌株 *B. proteolyticus*、S9 组接种菌株 *B. wiedmannii*。

2.2 白花前胡幼苗培育

随机筛选出饱满健康的白花前胡种子进行播种并置于灭菌土壤为基质的培育盘中(培育盘用 75%乙醇反复擦拭 3 次),于室温下培养。根据实际情况适量浇水,待出苗 10~15 d,幼苗真叶完全展开后,选取健康、长势一致的幼苗用于接下来的盆栽接种实验。

2.3 试验设计

2021 年 3 月,在重庆市万州区校园内进行室温盆栽试验。供试土壤为重庆三峡学院校园内基土、河沙和有机肥(2:1:1),过 8 mm 土壤筛,121 °C 高温间歇灭菌 2 h,取出放置 7 h 后备用。栽培容器为口径 15 cm,高 18 cm 的塑料花盆(用 75%乙醇反复擦拭 3 次)。将课题组前期分离活化的优势菌种用无菌生理盐水调节菌悬液浓度至 2×10^8 CFU/mL 制成接种剂。于 2021 年 4 月接种白花前胡实生苗,在植株滴水线下方挖穴长 8 cm、宽 5 cm、深 10 cm,将 30 mL 的 PGPR 菌剂施入穴中,对照组施加等量无菌生理盐水,覆土,使菌剂均匀分布在植株根部。每个处理 6 次重复,每盆接种 3 株白花前胡实生苗。于 2021 年 12 月中旬采收白花前胡药材,将根茎于 35 °C 烘干,粉碎后过 80 目筛,密封干燥保存;采用抖根法收取其根际土壤,室温自然风干,密封干燥保存备用。

2.4 指标的测定

2.4.1 有效成分含量测定 白花前胡甲素和白花前胡乙素均采用高效液相色谱法进行测定,具体提取及测定方法参照《中国药典》2020 年版^[14]。

(1) 色谱条件:色谱柱为 Agela Venusil XBP-C₁₈ 柱(250 mm×4.6 mm, 5 μm);流动相为乙腈(A)-水(B),梯度洗脱(0~40 min, 30%~60% A);检测波长 203 nm;柱温 30 °C;体积流量 1.0 mL/min;进样量 20 μL。

(2) 对照品溶液的制备:精密称取白花前胡甲素、白花前胡乙素对照品适量,加甲醇制成含 0.205 0 mg/mL 白花前胡甲素、0.198 5 mg/mL 白花前胡乙素的混合对照品溶液,即得。

(3) 供试品溶液的制备: 取本品粉末(过三号筛) 0.50 g, 精密称定后, 置具塞锥形瓶中, 精密加入三氯甲烷 25 mL, 密塞, 称定质量, 超声处理(功率 250 W、频率 33 kHz) 10 min, 放冷, 再称定质量, 用三氯甲烷补足减失的质量, 摇匀, 滤过; 精密量取续滤液 5 mL, 蒸干, 残渣加甲醇溶解并转移至 25 mL 量瓶中, 加甲醇至刻度, 摇匀, 即得, 制备供试品溶液, 即得。

(4) 方法学考察: 精密量取(2)项 0.1、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 mL 的混合对照品溶液, 置 50 mL 量瓶中, 70% 甲醇稀释至刻度, 摇匀制成一定质量浓度差的 6 份溶液。各进样 10 μ L, 以白花前胡甲素质量浓度为纵坐标(Y), 峰面积值为横坐标(X), 绘制标准曲线, 得回归方程为 $Y=4.6 \times 10^{-7} X+1.94178 \times 10^{-3}$, $R^2=0.9999$, 结果表明, 白花前胡甲素对照品在 0.5~10.0 μ g/mL 内呈良好的线性关

系; 以白花前胡乙素质量浓度为纵坐标(Y), 峰面积值为横坐标(X), 绘制标准曲线, 得回归方程为 $Y=4.8 \times 10^{-7} X+1.94770 \times 10^{-3}$, $R^2=0.9999$, 结果表明, 白花前胡乙素对照品在 0.5~10.0 μ g/mL 呈良好的线性关系。根据《中国药典》2020 年版^[14]方法, 经方法学考察, 精密度、重复性、稳定性、加样回收率试验等均符合含量测定要求。

(5) 样品测定: 取供试品溶液, 进样前过 0.22 μ m 微孔滤膜, 进样 20 μ L, 进行 HPLC 分析, 测定峰面积, 按照标准曲线方程计算白花前胡甲素、白花前胡乙素质量分数。白花前胡甲素、白花前胡乙素对照品及供试品分离的色谱图如图 1 所示, 由图 1 可知, 白花前胡甲素、白花前胡乙素均可在 40 min 内有效分离, 并与其他化学成分无干扰, 供试品与对照品白花前胡甲素、白花前胡乙素保留时间一致, 各相邻色谱峰之间的分离度均大于 1.5。

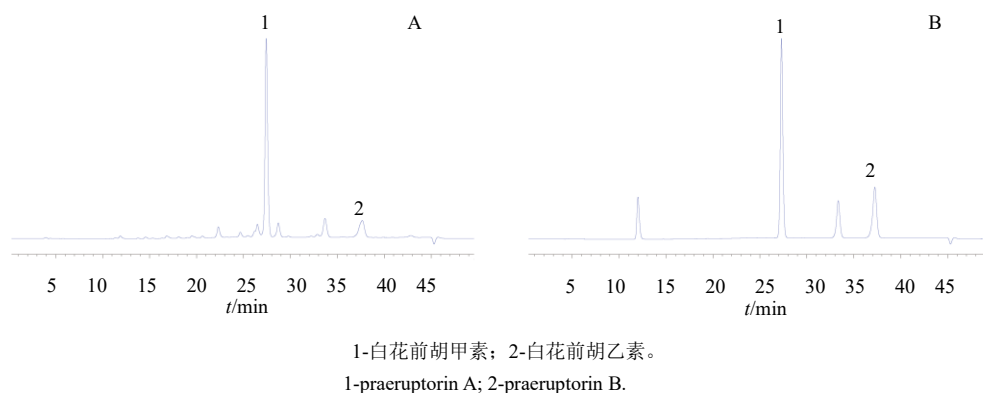


图 1 混合对照品 (A) 和供试品 (B) HPLC 图谱

Fig. 1 HPLC of mixed reference substance (A) and test substance (B)

2.4.2 磷素形态及有效性测定 全磷采用 $H_2SO_4-HClO_4$ 消煮法^[15]测定; 无机磷形态采用顾益初^[16]连续分级方法测定; 有机磷采用灼烧法^[15]测定; 速效磷采用碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法^[15]测定。

2.4.3 钾素形态及有效性测定 钾素形态均采用鲍士旦^[15]方法测定。其中, 酸溶钾采用 1 mol/L 热 HNO_3 消煮, 再用火焰分光光度计进行测定; 速效钾采用 1 mol/L NH_4OAc 浸提, 再用火焰分光光度计进行测定; 水溶性钾以水土比 10:1 浸提, 再用火焰分光光度计进行测定。利用算法获得土壤矿物钾、交换性钾和缓效钾的含量。

矿物钾=全钾-速效钾-缓效钾

交换性钾=速效钾-水溶性钾

缓效钾=酸溶钾-速效钾

2.5 数据处理

原始数据处理采用 Excel 2019 软件, 单因素方差分析、相关性分析及通径分析采用 SPSS 25.0 软件; 作图采用 GraphPad Prism 8.0.2 软件。

3 结果与分析

3.1 接种不同 PGPR 对白花前胡根部中香豆素类含量的影响

由表 1 可知, 与 CK 组相比, 所有处理组的白花前胡有效成分质量分数均显著提高 ($P<0.05$)。其中 S6 组白花前胡甲素质量分数最高, 是 CK 组的 2.91 倍, 其次为 S9、S8 组, 分别是 CK 的 2.86、2.76 倍; S1、S4 组增长幅度大致相同, 表明这 2 种菌剂对白花前胡甲素的提升效果相似; S2 组白花前胡乙素质量分数最高, 是 CK 组的 5.81 倍, 其次为 S4 组, 是 CK 组的 5.21 倍; S2 组白花前胡甲素和

表 1 接种不同 PGPR 对白花前胡根部中香豆素类含量的影响 ($n=6$)

Table 1 Effects of inoculation with different PGPRs on contents of coumarin compounds in roots of *P. praeruptorum* ($n = 6$)

处理	白花前胡甲素/%	白花前胡乙素/%	白花前胡甲素+白花前胡乙素/%	组分比 (白花前胡甲素:白花前胡乙素)
S1	0.949±0.013*	0.298±0.001*	1.247±0.010*	1.000:3.186*
S2	0.971±0.012*	0.784±0.001*	1.755±0.007*	1.000:1.239
S3	0.930±0.009*	0.471±0.008*	1.401±0.012*	1.000:1.973
S4	0.953±0.001*	0.703±0.001*	1.656±0.001*	1.000:1.355
S5	1.203±0.003*	0.302±0.001*	1.505±0.002*	1.000:3.983*
S6	1.335±0.010*	0.359±0.002*	1.694±0.007*	1.000:3.720*
S7	1.231±0.011*	0.292±0.001*	1.523±0.008*	1.000:4.217*
S8	1.265±0.003*	0.305±0.001*	1.570±0.001*	1.000:4.147*
S9	1.309±0.010*	0.257±0.002*	1.566±0.007*	1.000:5.093*
CK	0.458±0.002	0.135±0.002	0.594±0.007	1.000:3.379

与 CK 组比较: * $P<0.05$, ** $P<0.01$, 表 2、3 同。

* $P<0.05$ ** $P<0.01$ vs CK group, same as below tables 2 and 3.

白花前胡乙素总质量分数最高, 是 CK 组的 2.95 倍, 其次为 S4、S6 组, 分别是 CK 组的 2.79、2.85 倍。根据白花前胡甲素与白花前胡乙素组分比值可知, 除 S2、S3、S4 组外, 其余处理组白花前胡甲素与白花前胡乙素组分比均显著性高于 CK 组 ($P<0.05$)。其中, S9 组组分比最大, 是 CK 组的 1.51 倍, 其次为 S7、S8 组, 分别是 CK 组的 1.25、1.23 倍。整体上来看, 以 S2 组为优, 白花前胡甲素、白花前胡乙素含量分别较 CK 组增长了 0.513%、0.649%。符合《中国药典》2020 年版^[17]含量测定项下对白花前胡质量的规定要求(白花前胡甲素 $\geq 0.90\%$, 白花前胡乙素 $\geq 0.24\%$)。

3.2 接种不同 PGPR 对白花前胡根际土壤磷素含量的影响

由表 2 可知, 各组磷素相对含量均表现为无机磷>有机磷。与 CK 组相比, 接种不同 PGPR 能够明显提高白花前胡根际土壤全磷含量 ($P<0.05$)。其中, S2 组提高最为显著, 是 CK 的 1.29 倍, 其次是 S6、S5 组, 分别是 CK 组的 1.21、1.18 倍; S5

组处理后无机磷含量最高, 是 CK 的 1.41 倍, 其次是 S4 组、S6 组, 分别是 CK 组的 1.32、1.23 倍; S8 组处理后有机磷含量最高, 是 CK 的 2.25 倍, 其次是 S9 组、S7 组, 分别是 CK 组的 1.96、1.94 倍; S6 组处理后有效磷含量最高, 是 CK 的 1.18 倍, 其次是 S2 组、S4 组, 分别是 CK 组的 1.16、1.12 倍。整体来说, 以 S5 组处理为优。

3.3 接种不同 PGPR 对白花前胡根际土壤 Hedley 磷分级的影响

由表 3 可知, 在各无机磷形态占比中, 所有处理组各无机磷形态的相对含量均呈现磷酸八钙型 ($\text{Ca}_8\text{-P}$)>磷酸石灰型 ($\text{Ca}_{10}\text{-P}$)>磷酸二钙型 ($\text{Ca}_2\text{-P}$)>磷酸铝盐 (Al-P)>磷酸铁盐 (Fe-P)>闭蓄态盐 (O-P) 趋势。与 CK 组相比, 接种 PGPR 的 S1~S9 组白花前胡根际土壤各形态无机磷含量均有明显的增加, 部分存在显著性差异 ($P<0.05$)。Al-P 测定结果表明, S5 组 Al-P 含量较 CK 组提高了 21.808 mg/kg, 显著高于其他处理, 其次为 S4 组、S6 组, 分别是 CK 的 1.26、1.22 倍。

表 2 接种不同 PGPR 对白花前胡根际土壤磷素含量的影响 ($n=6$)

Table 2 Effects of inoculation with different PGPRs on phosphorus content in rhizosphere soil of *P. praeruptorum* ($n = 6$)

处理	全磷/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	无机磷		有机磷		有效磷/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
		质量分数/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	占全磷比例/%	质量分数/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	占全磷比例/%	
S1	1.205±0.003*	789.928±0.003*	65.58±0.01*	43.309±0.004	3.60±0.01*	10.481±0.002*
S2	1.357±0.027*	860.386±0.003*	63.42±0.02*	60.053±0.178*	4.42±0.01	11.827±0.005*
S3	1.086±0.013*	855.051±0.003*	78.72±0.01*	54.513±0.299*	5.01±0.02	10.312±0.003
S4	1.097±0.001*	965.189±0.025*	88.00±0.02*	58.273±0.273*	5.31±0.02*	11.421±0.009*
S5	1.246±0.001*	1032.488±0.004*	82.85±0.01*	74.451±0.097*	5.97±0.01*	11.384±0.003*
S6	1.274±0.002*	903.741±0.004*	70.96±0.01	60.354±0.054*	4.74±0.01	12.065±0.001*
S7	1.135±0.002*	852.688±0.001*	75.16±0.01*	81.730±0.008*	7.20±0.01*	10.821±0.011
S8	1.075±0.001*	821.024±0.013*	76.34±0.01*	94.852±0.043*	8.82±0.01*	10.630±0.008*
S9	1.102±0.002*	831.302±0.020*	75.41±0.02*	82.619±0.207*	7.49±0.02*	10.645±0.003*
CK	1.053±0.002	732.023±0.006	69.55±0.01	42.125±0.029	4.00±0.01	10.222±0.002

表 3 接种不同 PGPR 对白花前胡根际土壤无机磷含量的影响 ($n=6$)Table 3 Effects of inoculation with different PGPRs on content of inorganic phosphorus in rhizosphere soil of *P. praeruptorum* ($n = 6$)

处理	Al-P		Ca ₂ -P		Ca ₈ -P	
	质量分数/(mg·kg ⁻¹)	占无机磷总量比例/%	质量分数/(mg·kg ⁻¹)	占无机磷总量比例/%	质量分数/(mg·kg ⁻¹)	占无机磷总量比例/%
S1	58.654±0.008*	7.343±0.132*	133.196±0.078*	16.680±1.377*	382.827±0.049*	48.157±1.240*
S2	58.374±0.004*	6.807±0.060	131.603±0.008*	15.317±0.076*	455.458±0.003*	52.937±0.254*
S3	60.860±0.019*	7.130±0.114	136.598±0.011*	16.010±0.219*	452.584±0.003*	53.040±0.347*
S4	63.207±0.017*	6.553±0.042*	141.629±0.003*	14.680±0.262*	497.572±0.015*	51.573±0.270*
S5	72.169±0.038*	7.023±0.268	149.148±0.001*	14.510±0.125*	527.509±0.003*	51.320±0.373*
S6	61.386±0.006*	6.807±0.055	134.714±0.003*	14.933±0.065*	454.013±0.008*	50.320±0.291
S7	56.188±0.014*	6.610±0.128*	129.309±0.007*	15.210±0.062*	456.181±0.002*	53.660±0.193*
S8	55.436±0.053*	6.880±0.582	127.096±0.002*	15.753±0.477*	384.406±0.044*	47.607±1.022*
S9	55.276±0.053*	6.747±0.479	127.326±0.002*	15.533±0.406*	393.554±0.071*	46.580±1.022*
CK	50.361±0.030	6.967±0.352	122.782±0.010f	16.973±0.180	362.349±0.002	50.093±0.964

处理	Ca ₁₀ -P		Fe-P		O-P	
	质量分数/(mg·kg ⁻¹)	占无机磷总量比例/%	质量分数/(mg·kg ⁻¹)	占无机磷总量比例/%	质量分数/(mg·kg ⁻¹)	占无机磷总量比例/%
S1	174.786±0.015*	21.883±0.215*	45.452±0.040*	5.693±0.322*	3.842±0.099	0.480±0.053
S2	154.969±0.011	18.060±0.151*	53.409±0.036*	6.223±0.197*	4.283±0.039	0.500±0.020
S3	146.385±0.029	17.151±0.438*	52.095±0.021*	6.103±0.102*	4.831±0.142	0.593±0.050
S4	195.429±0.017*	20.257±0.117*	59.521±0.017*	6.167±0.143*	7.466±0.782	0.767±0.587
S5	207.721±0.012*	20.207±0.107*	62.997±0.018*	6.130±0.154*	8.345±0.787	0.810±0.678
S6	187.863±0.017*	20.820±0.420*	58.466±0.002*	6.480±0.020*	5.380±0.407	0.650±0.469
S7	148.804±0.007	17.503±0.151*	54.283±0.053*	6.383±0.311*	5.874±0.726	0.633±0.258
S8	181.029±0.078*	22.410±1.203*	54.547±0.012*	6.760±0.161*	4.777±0.034	0.593±0.029
S9	186.834±0.020*	22.800±1.071*	52.359±0.015*	6.390±0.271*	4.831±0.132	0.587±0.064
CK	147.100±0.025	20.333±0.365	38.215±0.337	5.260±1.680	2.744±0.151	0.377±0.065

Ca₂-P 测定结果表明, 与 CK 组相比, 接种 PGPR 能够有效提高 Ca₂-P 含量 ($P<0.05$)。其中 S5 组含量最高为 149.148 mg/kg, 是 CK 的 1.21 倍, 其次为 S4、S3 组, 分别是 CK 的 1.15、1.10 倍。Ca₈-P 测定结果表明, 与 CK 组相比, 接种 PGPR 能够显著性提高 Ca₈-P 含量 ($P<0.05$)。其中 S5 组含量最高为 527.509 mg/kg, 较 CK 组提高了 165.16 mg/kg, 其次为 S4、S7 组, 分别较 CK 组提高了 135.223 mg/kg、93.832 mg/kg。Ca₁₀-P 测定结果表明, 与 CK 组相比, S5 组含量最高为 207.721 mg/kg, 显著高于其他处理, 是 CK 组的 1.41 倍, 其次是 S4、S6 组, 分别是 CK 的 1.33、1.28 倍。Fe-P 测定结果表明, S5 组 Fe-P 含量最高为 62.997 mg/kg, 较 CK 组提高了 24.782 mg/kg, 其次是 S4、S6 组, 分别较 CK 组提高了 21.306、20.251 mg/kg。O-P 测定结果表明, 接种 PGPR 可以提高白花前胡根际土壤 O-P 含量, 但与 CK 组相比均无统计学差异 ($P>0.05$), 说明接种 PGPR 对 O-P 含量影响较小。整体上

来说, 以 S5 处理组为优。

3.4 根际土壤中 Hedley 各形态磷组分与有效磷的相关性分析

由表 4 可知, Al-P 与 Ca₂-P、Ca₈-P、Fe-P、O-P 均呈极显著正相关 ($P<0.01$), 相关系数分别为 Ca₂-P (0.983) > O-P (0.873) > Ca₈-P (0.864) > Fe-P (0.784), 与 Ca₁₀-P 呈显著性正相关 ($r=0.645$, $P<0.05$); Ca₂-P 与 Ca₈-P、O-P 呈极显著正相关, 相关系数分别为 Ca₂-P (0.874) > O-P (0.867), 与 Fe-P 呈显著性正相关 (0.734); Ca₈-P 与 Fe-P、O-P 呈极显著正相关, 相关系数分别为 O-P (0.880) > Fe-P (0.832); Ca₁₀-P 与 Fe-P、O-P 呈显著性正相关, 相关系数分别为 O-P (0.655) > Fe-P (0.740); Fe-P 与 O-P 呈极显著正相关 ($r=0.0909$, $P<0.01$), 与有效磷呈显著性正相关 ($r=0.633$, $P<0.05$); 有效磷与全磷呈显著性正相关 ($r=0.763$, $P<0.05$)。

表 4 各处理不同形态无机磷、有机磷与有效磷相关性分析

Table 4 Correlation analysis of different forms of inorganic, organic and available phosphorus in each treatment

指标	相关系数								
	有机磷	Al-P	Ca ₂ -P	Ca ₈ -P	Ca ₁₀ -P	Fe-P	O-P	有效磷	全磷
有机磷	1.000								
Al-P	0.064	1.000							
Ca ₂ -P	-0.004	0.983**	1.000						
Ca ₈ -P	0.103	0.864**	0.874**	1.000					
Ca ₁₀ -P	0.499	0.645*	0.604	0.402	1.000				
Fe-P	0.537	0.784**	0.734*	0.832**	0.655*	1.000			
O-P	0.420	0.873**	0.867**	0.880**	0.740*	0.909**	1.000		
有效磷	0.087	0.482	0.430	0.611	0.418	0.633*	0.514	1.000	
全磷	-0.207	0.441	0.355	0.413	0.179	0.359	0.203	0.763*	1.000

*表示在 $P<0.05$ 级别（双尾）相关性显著；**表示在 $P<0.01$ 级别（双尾）相关性显著，下同。

*At the $P<0.05$ level (two tailed), the correlation is significant; **At the $P<0.01$ level (double tailed), the correlation is significant, same as below.

3.5 接种不同 PGPR 对白花前胡根际土壤各形态钾素含量与比例的影响

缓效钾、速效钾、水溶钾，统称为有效态钾。如表 5 所示，各组有效态钾含量均表现为缓效钾>交换钾>水溶钾。接种 PGPR 的各处理组白花前胡根际土壤水溶钾、交换钾、缓效钾含量占有效态钾总量的比例分别为 4.74%~6.72%、7.94%~12.25%、61.76%~86.32%。与 CK 组相比，接种 PGPR 后 S1~S9 组白花前胡根际土壤中各钾素形态含量均显著性提高 ($P<0.05$) (表 5)。全钾结果表明，所有处理组均显著高于 CK 组 ($P<0.05$)，其中 S1 组含量最高，是 CK 组的 2.05 倍，其次为 S3、S2 组，分别是 CK 的 1.76、1.57 倍；水溶性钾结果表明，除 S4 组外，其余

处理组含量均高于 CK 组，且部分差异显著 ($P<0.05$)，其中，S3 组水溶钾含量最高，是 CK 组的 1.73 倍，其次为 S1、S2 组，分别是 CK 组的 1.64、1.49 倍；交换钾结果表明，除 S3 组外，其余处理组均高于 CK 组，且部分差异显著 ($P<0.05$)，其中，S4 组含量最高，是 CK 组的 1.06 倍，其次为 S9、S8 组，分别是 CK 的 1.05、1.04 倍；缓效钾结果表明，所有处理组均显著高于 CK 组 ($P<0.05$)，其中，S1 组含量最高，是 CK 组的 4.64 倍，其次为 S3、S2 组，分别是 CK 的 4.10、3.85 倍；矿物钾结果表明，所有处理组均显著高于 CK 组 ($P<0.05$)，其中，S1 组含量最高，是 CK 组的 2.01 倍，其次为 S3、S2 组，分别是 CK 的 1.71、1.53 倍。整体来说，以 S1 组处理为优。

表 5 接种不同 PGPR 对白花前胡根际土壤各形态钾素含量与比例的影响 ($n=6$)

Table 5 Effects of inoculation with different PGPR on forms K content and proportion in rhizosphere soil of *P. praeruptorum* ($n = 6$)

处理全钾/(mg·kg ⁻¹)	水溶钾		交换钾		缓效钾		矿物钾	
	质量分数/(mg·kg ⁻¹)占有有效态钾比例/%		质量分数/(mg·kg ⁻¹)占有有效态钾比例/%		质量分数/(mg·kg ⁻¹)占有有效态钾比例/%		质量分数/(g·kg ⁻¹)	
S1	56.325±0.002*	176.966±0.011*	5.74±0.06*	244.881±0.011	7.94±0.08*	2 661.101±0.001*	86.32±0.14*	53.242±0.003*
S2	43.104±0.005*	161.535±0.004*	6.22±0.03*	224.448±0.004*	8.70±0.01*	2 209.172±0.002*	85.13±0.07*	40.509±0.005*
S3	48.189±0.002*	187.278±0.010*	6.72±0.06*	247.139±0.010	8.63±0.01*	2 352.498±0.002*	84.41±0.15*	45.402±0.002*
S4	40.662±0.005*	108.508±0.019	4.74±0.09*	261.826±0.019*	11.33±0.24	1 921.300±0.003*	83.84±0.30*	38.370±0.006*
S5	35.807±0.006*	143.094±0.005*	6.51±0.03*	237.676±0.005*	10.82±0.05*	1 816.262±0.001*	82.67±0.08*	33.610±0.007*
S6	35.947±0.020	123.143±0.001*	5.20±0.01*	248.887±0.001	10.50±0.02*	1 997.718±0.001*	84.30±0.03*	33.578±0.002*
S7	37.717±0.005*	108.473±0.001	4.75±0.04*	254.190±0.001*	11.08±0.01*	1 930.487±0.001*	84.22±0.06*	38.370±0.006*
S8	41.782±0.009*	114.931±0.005	5.50±0.03*	256.005±0.005*	12.25±0.06*	1 719.550±0.003*	82.26±0.10*	39.691±0.010*
S9	38.906±0.004*	110.494±0.002	4.83±0.01*	260.289±0.002*	11.36±0.03	1 919.329±0.001*	83.64±0.27*	36.616±0.004*
CK	27.453±0.006	108.112±0.018	11.64±0.22	247.191±0.018	26.61±0.50	573.694±0.013	61.76±0.72	26.524±0.006

3.6 白花前胡根际土壤中各形态钾素间的相关性

相关性分析表明(表 6),全钾与矿物钾、速效钾、缓效钾均呈极显著正相关($P<0.01$),相关系数分别为矿物钾(0.999)>缓效钾(0.871)>速效钾(0.837),与水溶钾呈显著性正相关($r=0.738$, $P<0.05$);矿物钾与速效钾、缓效钾呈极显著正相关($P<0.01$),相关

系数分别为缓效钾(0.852)>速效钾(0.836),与水溶钾呈显著性正相关($r=0.735$, $P<0.05$);速效钾与水溶钾呈极显著正相关($r=0.938$, $P<0.01$),与缓效钾呈显著性正相关($r=0.719$, $P<0.05$);缓效钾与水溶钾呈显著性正相关($r=0.657$, $P<0.05$),各钾素形态均与交换钾呈非显著性负相关($P>0.05$)。

表 6 白花前胡根际土壤中各形态钾素间的相关性分析

Table 6 Correlation analysis among various forms K in the rhizosphere soil of *P. praeruptorum*

指标	相关系数					
	全钾	矿物钾	速效钾	缓效钾	水溶钾	交换钾
全钾	1.000					
矿物钾	0.999**	1.000				
速效钾	0.837**	0.836**	1.000			
缓效钾	0.871**	0.852**	0.719*	1.000		
水溶钾	0.738*	0.735*	0.938**	0.657*	1.000	
交换钾	-0.112	-0.106	-0.290	-0.160	-0.604	1.000

3.7 接种不同 PGPR 对土壤的磷、钾形态含量与白花前胡根部品质关系

相关性分析表明(表 7),接种 PGPR 后白花前胡根际土壤各形态磷素、钾素含量与白花前胡甲素、乙素存在着相关性,有机磷、Fe-P 与白花前胡甲素呈显著正相关($P<0.05$),矿物钾与白花前胡甲素呈极显著负相关($P<0.01$)。其中,与白花前胡甲素含量的相关系数为 Fe-P(0.729)>有机磷(0.688)>矿物钾(-0.782),而各形态磷、钾含量与白花前胡乙素无显著相关关系,故对其进行进一步的通径分析。

由表 8 可知,Fe-P、Ca₈-P、速效钾、缓效钾对白花前胡甲素的直接通径系数分别为 2.939、-1.730、-1.378、0.612,表明 Fe-P、缓效钾含量的增加会促进白花前胡甲素的积累,而 Ca₈-P、速效钾含量的减少会促进白花前胡甲素含量的增加。有机磷、Ca₈-P、Ca₁₀-P、有效磷与 Fe-P 的间接通径系数分别为 1.578、2.445、1.925、1.860,远大于与其他形态磷素、钾素形态对白花前胡甲素的间接通径系数,这说明有机磷、Ca₈-P、Ca₁₀-P、有效磷与 Fe-P 间的相关关系较其他元素形态与白花前胡甲素的相关关系更为密切,故可通过四者对 Fe-P 的影响表征其对白花前胡甲素含量变化的贡献程度,因此有机磷、Ca₈-P、Ca₁₀-P、有效磷通过间接作用影响白花前胡甲素含量;Fe-P、有机磷、速效钾、有效磷对白花前胡乙素的直接通径系数分别为-7.722、4.879、4.606、4.219,这表明有机磷、速效钾、有效

磷含量的增加有助于白花前胡乙素的积累,而 Fe-P 含量的减少有助于白花前胡乙素的增加。有机磷、Ca₈-P、Ca₁₀-P、有效磷与 Fe-P、Ca₈-P 的间接通径系数分别为 2.620、3.346、2.671、2.578,远大于与其他磷素、钾素形态对白花前胡乙素的间接通径系数,表明有机磷、Ca₈-P、Ca₁₀-P、有效磷是通过与 Fe-P、Ca₈-P 较大的相关关系对白花前胡乙素进行间接影响。整体上来说,有机磷、Ca₈-P、Fe-P、Ca₁₀-P、有效磷、速效钾、缓效钾含量是影响白花前胡甲素、白花前胡乙素的主要因素。

4 讨论

磷是植物生长的第二营养素,参与植物的新陈代谢,促进植株根系发育,土壤中含磷元素较为丰富,但大多数以不可溶的无效态存在,由于植物自身对磷的吸收和利用率低,因此土壤中大部分磷无法被植物高效利用^[17]。研究表明,由于长期大量使用磷肥,导致磷肥利用率仅有 10%~25%,使得土壤中各形态磷素出现不同程度累积,有效地活化土壤中难溶性磷,促进难溶性磷向有效性磷转化是高效利用土壤磷素减少磷肥施用的有效方法之一^[18]。罗园园等^[19]研究指出,接种 AM 真菌可以促进土壤中不同形态磷的形成,提高土壤的磷素利用率。PGPR 与 AM 真菌有着类似的作用,但其对白花前胡根际土壤磷素的转化鲜有报道。本研究发现,白花前胡根际土壤各磷素含量依次为无机磷>有机磷>有效磷,无机磷形态含量依次为 Ca₈-P>Ca₁₀-P>Ca₂-P>Al-P>Fe-P>O-P,绝大部分处理

表7接种不同PGPR对土壤的磷、钾形态含量与白花前胡根部品质相关性分析

Table 7 Correlation analysis of P and K form content in rhizosphere soil inoculated with different PGPRs and roots quality of *P. praeruptorum*

指标	相关系数															白花前胡甲素	白花前胡乙素
	有机磷	Al-P	Ca ₂ -P	Ca ₈ -P	Ca ₁₀ -P	Fe-P	O-P	有效磷	全磷	全钾	矿物钾	速效钾	缓效钾	水溶钾	交换钾		
有机磷	1.000																
Al-P	0.064	1.000															
Ca ₂ -P	-0.004	0.983**	1.000														
Ca ₈ -P	0.103	0.864**	0.874**	1.000													
Ca ₁₀ -P	0.499	0.645*	0.604	0.402	1.000												
Fe-P	0.537	0.784**	0.734*	0.832**	0.655*	1.000											
O-P	0.420	0.873**	0.867**	0.880**	0.740*	0.909**	1.000										
有效磷	0.087	0.482	0.430	0.611	0.418	0.633*	0.514	1.000									
全磷	-0.207	0.441	0.355	0.413	0.179	0.359	0.203	0.763*	1.000								
全钾	-0.207	0.441	0.355	0.413	0.179	0.359	0.203	0.763*	1.000**	1.000							
矿物钾	-0.216	-0.610	-0.543	-0.646*	-0.373	-0.781**	-0.591	-0.577	-0.590	-0.590	1.000						
速效钾	-0.506	0.264	0.294	0.035	-0.181	-0.080	-0.121	-0.295	0.132	0.132	-0.237	1.000					
缓效钾	-0.056	0.400	0.387	0.283	0.138	0.377	0.205	0.147	0.438	0.438	-0.742*	0.719*	1.000				
水溶钾	-0.596	0.310	0.315	0.105	-0.234	-0.082	-0.146	-0.116	0.388	0.388	-0.239	0.938**	0.657*	1.000			
交换钾	0.483	-0.250	-0.193	-0.210	0.229	0.043	0.125	-0.358	-0.769**	-0.769**	0.116	-0.290	-0.160	-0.604	1.000		
白花前胡甲素	0.688*	0.355	0.236	0.309	0.524	0.729*	0.505	0.353	0.269	0.269	-0.782**	-0.090	0.467	-0.158	0.228	1.000	
白花前胡乙素	-0.064	0.305	0.364	0.517	0.013	0.411	0.273	0.544	0.433	0.433	-0.401	0.213	0.444	0.293	-0.320	-0.009	1.000

表8接种不同PGPR对土壤的磷、钾形态含量与白花前胡根部品质通径分析

Table 8 Path analysis of P and K form content in rhizosphere soil inoculated with different PGPRs and roots quality of *P. praeruptorum*

品质指标	自变量	相关系数	直接通径系数	间接通径系数								
				有机磷	Ca ₈ -P	Ca ₁₀ -P	Fe-P	有效磷	矿物钾	速效钾	缓效钾	交换钾
白花前胡甲素	有机磷	0.688	-1.158	—	-0.178	-0.008	1.578	-0.104	0.081	0.697	-0.034	-0.186
	Ca ₈ -P	0.309	-1.730	-0.119	—	-0.006	2.445	-0.729	0.244	-0.048	0.173	0.081
	Ca ₁₀ -P	0.524	-0.016	-0.578	-0.696	—	1.925	-0.499	0.141	0.249	0.084	-0.088
	Fe-P	0.729	2.939	-0.622	-1.440	-0.010	—	-0.756	0.294	0.110	0.231	-0.017
	有效磷	0.353	-1.194	-0.101	-1.057	-0.007	1.860	—	0.218	0.407	0.090	0.138
	矿物钾	-0.782	-0.377	0.250	1.118	0.006	-2.295	0.689	—	0.327	-0.454	-0.045
	速效钾	-0.090	-1.378	0.586	-0.061	0.003	-0.235	0.352	0.089	—	0.440	0.112
	缓效钾	0.467	0.612	0.065	-0.490	-0.002	1.108	-0.175	0.280	-0.991	—	0.062
	交换钾	0.228	-0.385	-0.559	0.363	-0.004	0.126	0.427	-0.044	0.400	0.062	—
白花前胡乙素	自变量	相关系数	直接通径系数	间接通径系数								
				有机磷	Ca ₈ -P	Ca ₁₀ -P	Fe-P	有效磷	矿物钾	速效钾	缓效钾	交换钾
	有机磷	-0.064	4.879	—	0.414	-0.126	-4.146	0.367	0.187	-2.331	0.104	0.585
	Ca ₈ -P	0.517	4.022	0.503	—	-0.101	-6.424	2.578	0.558	0.161	-0.525	-0.254
	Ca ₁₀ -P	0.013	-0.252	2.435	-0.101	—	-5.058	1.764	0.322	-0.834	-0.256	0.277
	Fe-P	0.411	-7.722	2.620	3.346	-0.165	—	2.671	0.675	-0.368	-0.699	0.052
	有效磷	0.544	4.219	0.425	2.457	-0.105	-4.888	—	0.499	-1.359	-0.273	-0.433
	矿物钾	-0.401	-0.864	-1.054	-2.598	0.094	6.031	-2.435	—	-1.092	1.376	0.140
	速效钾	0.213	4.606	-2.469	0.141	0.046	0.618	-1.245	0.205	—	-1.333	-0.351
	缓效钾	0.444	-1.854	-0.273	1.138	-0.035	-2.911	0.620	0.641	3.312	—	-0.194
	交换钾	-0.320	1.211	2.357	-0.845	0.277	-0.332	-1.511	-0.100	-1.336	0.297	—

组各形态无机磷、全磷、有机磷含量明显优于 CK 组,且整体上以 S5 组为优,表明接种 PGPR 对白花前胡根际土壤各形态磷素含量及有效性具有较好的提升效果,这可能是因为土壤中无机磷含量较高,而 S5 组所接种的 *B. aryabhattai* 属于解无机磷菌,具有较强解无机磷效能,能够通过释放有机酸来溶解不可溶的无效态磷,促进各磷素间相互转化,从而提高白花前胡植株对磷素的利用率^[20]。

速效钾是土壤钾库中最活跃的组分,反映着土壤的供钾能力和钾素水平^[21]。本研究表明,白花前胡根际土壤中不同钾素形态含量表现为矿物钾>缓效钾>交换钾>水溶钾,且绝大部分处理组各形态钾素含量均明显高于 CK 组,且整体上以 S1 组为优。相关性分析表明,各形态钾素均存在一定的相关性。表明接种 PGPR 能够有效提升白花前胡根际土壤各形态钾素含量,且土壤钾素之间存在着一种动态平衡,在一定条件下各形态钾素均可相互转化。究其原因可能为 S1 组所接菌种 *B. thuringiensis* 为解钾菌,具有较强解钾能力,能够分泌胞外多糖、有机酸等分解矿物质,促进有效态钾的释放及不同形态钾之间的相互转化,使得矿物钾向缓效钾转化。缓效钾向交换钾转化,交换钾向水溶钾转化,有效提升白花前胡根际土壤中钾的有效性,促进植株对钾元素的吸收利用,改善白花前胡植株品质^[20]。

白花前胡甲素、白花前胡乙素均是白花前胡的有效成分,具有抗炎、抗癌、护脑等生物活性^[22-25],《中国药典》2020 年版将其含量列为评价白花前胡药材品质的重要指标^[17]。本研究结果表明,各处理组白花前胡甲素、白花前胡乙素含量均明显高于 CK 组,且各处理组白花前胡甲素、白花前胡乙素均达到药典标准(白花前胡甲素 $\geq 0.90\%$,白花前胡乙素 $\geq 0.24\%$),其中以 S2 处理组为优。由于磷、钾形态含量存在差异,因此通过简单的相关分析不能很好的比较磷、钾形态组分对白花前胡甲素、白花前胡乙素的贡献性,故本研究采用了进行通径分析。结果表明,有机磷、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、有效磷、速效钾、缓效钾含量是影响白花前胡甲素、白花前胡乙素含量的主要因素。整体上来看,接种 PGPR 可以显著增加白花前胡根中白花前胡甲素、白花前胡乙素的含量,且具有统计学意义($P < 0.05$)。因此,接种 PGPR 后白花前胡药用成分含量的增加,可能与 PGPR 合成生物激素或活性有机物,促进了白花前胡植株根系的生长发育,增大

了白花前胡植株对营养元素的吸收,从而促进了香豆素类化合物的生成,提升了白花前胡的品质及药材合格率。

综上所述,接种不同 PGPR 能够显著增加白花前胡根际土壤中各形态磷素、钾素含量以及根部有效成分含量,且各形态磷素、钾素与白花前胡根部品质具有一定相关性。其中, Fe-P 、缓效钾对白花前胡甲素呈正效应,有机磷、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、有效磷、速效钾、交换钾对白花前胡乙素呈正效应。说明接种 PGPR 能够增加白花前胡根际土壤中营养元素含量,增大土壤肥力,改善土壤微环境,进而提升白花前胡药材品质。综合各指标考虑,S2、S4、S6 处理组接种效果最佳,可应用于白花前胡的大田种植,为培育优质的白花前胡提供参考。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 徐广,谭秋生,杨丹,等.不同提取方法对白花前胡指标成分含量的影响[J].亚太传统医药,2022,18(3): 42-44.
- [2] 宋丽雅,刘家水,谈永进,等.白花前胡的研究现状及展望[J].宜春学院学报,2020,42(12): 22-25.
- [3] 熊永兴,陈科力,刘义梅,等.药用植物白花前胡资源调查[J].时珍国医国药,2013,24(11): 2786-2789.
- [4] 邱国玉,李运,李晓春,等.前胡类药材的化学成分及质量控制方法研究[J].中国药事,2019,33(4): 446-459.
- [5] 吴沿胜,吴沿友,刘宇婧,等.前胡及其混伪品的中药鉴定学研究进展[J].中草药,2017,48(11): 2335-2339.
- [6] 周先建,张建国,杨玉霞,等.四川野生白花前胡资源调查研究[J].安徽农业科学,2020,48(13): 176-178.
- [7] 侯殿明.丛枝菌根真菌对盐渍土辣椒生长、生理代谢及土壤无机磷组分的影响[J].江苏农业科学,2022,50(15): 101-107.
- [8] 康慎敏,武瑞赞,穆文强,等.优良植物根际促生菌的筛选及其生物学特性[J].中国农业大学学报,2023,28(1): 137-152.
- [9] 王丹,赵顺鑫,吴洋桢,等.解钾细菌对滇重楼叶片面积、光合色素含量及生理生化的影响[J].中国实验方剂学杂志,2022,28(16): 150-155.
- [10] 江美彦,周杨,刘仁浪,等.白芷根际促生菌的筛选及其促生效果研究[J].生物技术通报,2022,38(8): 167-178.
- [11] 杨玲,杨敏,郭冬琴,等.混合丛枝菌根真菌接种时期对滇重楼幼苗内源激素含量的影响[J].中草药,2020,51(13): 3535-3544.
- [12] 周浓,朱芙蓉,杜慧慧,等.不同生境滇重楼根际解钾

- 菌的筛选与鉴定 [J]. 中国中药杂志, 2021, 46(5): 1073-1078.
- [13] 杜慧慧, 朱芙蓉, 杨敏, 等. 不同生境滇重楼根际解磷菌的筛选与鉴定 [J]. 中国中药杂志, 2021, 46(4): 915-922.
- [14] 中国药典 [S]. 一部. 2020: 277.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 263.
- [16] 顾益初, 蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷分级的测定方法 [J]. 土壤, 1990, 22(2): 101-102.
- [17] 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.
- [18] 关诗洋, 王佳琪, 于贺, 等. 减水减肥对设施黑土菜田土壤无机磷形态及分布的影响 [J]. 中国农学通报, 2021, 37(23): 89-93.
- [19] 罗园园, 郝鲜俊, 张铠珏. 接种 AM 真菌对煤矿区废弃土壤不同磷素形态的影响 [J]. 西南农业学报, 2019, 32(2): 381-388.
- [20] 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.
- [21] 威则日沙, 刘哲, 兰建龙, 等. 基于七叶一枝花中高含量皂苷类成分的氮、磷、钾配施方案研究 [J]. 中草药, 2021, 52(10): 3089-3096.
- [22] 宋芷琪, 李斌, 田琨宇, 等. 前胡与紫花前胡的化学成分和药理作用研究进展 [J]. 中草药, 2022, 53(3): 948-964.
- [23] 薛乃铭, 柴梦钰, 杨万山, 等. 白花前胡乙素通过 SREBP1c/FASN 信号通路抑制卵巢癌 SK-OV-3 细胞增殖的作用 [J]. 中国老年学杂志, 2021, 41(13): 2773-2777.
- [24] 邱清华. 白花前胡甲素通过调控 Bcl-2/Bax、Caspase9、Caspase3 的表达对大鼠脑缺血再灌注的保护作用 [D]. 福州: 福建医科大学, 2016.
- [25] 陈秋荷, 刘晓玲, 潘立行, 等. 白花前胡甲素联用低浓度紫杉醇对卵巢癌细胞紫杉醇耐药株 A2780/TAX 的作用研究 [J]. 中国医院药学杂志, 2022, 42(17): 1755-1759.

[责任编辑 时圣明]