

接种解有机磷细菌对滇重楼光合和生理生化的影响

李卓蔚, 骆亮仲, 郎佳琪, 叶明燕, 尹福强*, 赵晶晶, 周浓*

(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 404120)

[摘要] 目的:研究接种不同解有机磷细菌或复合菌对滇重楼叶片光合作用和生理生化特性的影响,为滇重楼的人工栽培找到合适的菌肥提供参考。方法:采用室内盆栽的方式,试验设为空白(CK)、接种 *Bacillus mycoides* (S1)、接种 *B. wiedmannii* (S2)、接种 *B. proteolyticus* (S3)、接种 *B. mycoides* 和 *B. wiedmannii* (S4)、接种菌株 *B. mycoides* 和 *B. proteolyticus* (S5)、接种 *B. wiedmannii* 和 *B. proteolyticus* (S6)、接种 *B. mycoides*、*B. wiedmannii* 和 *B. proteolyticus* (S7) 8个处理,观察接种不同解有机磷细菌或复合菌对滇重楼叶片生长发育、光合作用及各项生理生化指标的影响。结果:与空白组比较,处理组中滇重楼叶片的丙二醛含量显著降低($P < 0.05$),以S7组最为显著,含量仅为CK组的1/3左右;而叶片的叶面积、光合参数、光合色素含量、可溶性糖、可溶性蛋白、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性均有不同程度的提高。其中叶面积、可溶性糖和可溶性蛋白含量最高均为S7组,分别是CK组的2.8、2.1、2.2倍;SOD活性最高的为S6组,较CK组增长了2.9倍;POD和CAT活性最高的为S5组,较CK组分别增长了1.5倍和2.1倍。结论:接种不同解有机磷细菌或复合菌能促进滇重楼的生长发育,并提高其对环境的抗逆性。混合接种 *B. mycoides* 和 *B. proteolyticus* 及3种菌混合接种对滇重楼各方面的影响效果最佳,为滇重楼人工栽培在菌肥选择方面提供了参考依据。

[关键词] 滇重楼; 解有机磷细菌; 光合作用; 生理生化; 复合菌

[中图分类号] R284.2; R289; R22; R2-031; R33 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-9903(2022)16-0165-07

[doi] 10.13422/j.cnki.syfjx.20220919

[网络出版地址] <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3495.R.20220616.0819.001.html>

[网络出版日期] 2022-06-16 14:35

Effect of Organophosphate-Solubilizing Bacteria on Photosynthesis, Physiology, and Biochemistry of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*

LI Zhuowei, LUO Liangzhong, LANG Jiaqi, YE Mingyan, YIN Fuqiang*, ZHAO Jingjing, ZHOU Nong*
(The Chongqing Engineering Laboratory for Green Cultivation and Deep Processing of the
Three Gorges Reservoir Area's Medicinal Herbs, College of Food and
Biological Engineering Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404120, China)

[Abstract] **Objective:** To study the effect of organophosphate-solubilizing bacteria and compound bacteria on the photosynthesis and physiological and biochemical characteristics of leaves of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*, and to provide a reference for selecting suitable bacterial fertilizers in artificial cultivation of this medicinal species. **Method:** Pot experiment was carried out indoor and the following groups were designed: control (CK), inoculation with *Bacillus mycoides* (S1), inoculation with *B. wiedmannii* (S2), inoculation with *B. proteolyticus* (S3), inoculation with *B. mycoides* and *B. wiedmannii* (S4), inoculation with *B. mycoides* and *B. proteolyticus* (S5), inoculation with *B. wiedmannii* and *B. proteolyticus* (S6), and inoculation with

[收稿日期] 2022-04-15

[基金项目] 重庆市自然科学基金项目(cstc2018jcyjAX0267);“成渝地区双城经济圈建设”科技创新项目(KJCX2020046)

[第一作者] 李卓蔚,在读硕士,从事环境微生物与药用植物栽培研究,E-mail:lizhuowei@126.com

[通信作者] *尹福强,副教授,从事药用植物栽培研究,Tel:023-58102522,E-mail:20200002@sanxiau.edu.cn;

*周浓,教授,从事中药炮制与资源研究,Tel:023-58576130,E-mail:erhaizn@126.com

B. mycooides, *B. wiedmannii* and *B. proteolyticus* (S7). Then, the growth and development, photosynthesis, and various physiological and biochemical indexes of the leaves of this species were observed. **Result:** Compared with CK, the treatment groups showed decrease in content of malondialdehyde in the leaves ($P<0.05$), particularly S7 (content was only about 1/3 that of the CK). The leaf area, photosynthetic parameters, photosynthetic pigment content, soluble sugar content, soluble protein content, and activity of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), and catalase (CAT) in leaves of the treatment groups were all improved. Among them, the leaf area, soluble sugar content, and soluble protein content were the highest in S7, which were 2.8, 2.1, and 2.2 times that of the CK, respectively. SOD activity peaked in S6 (2.9 times higher than that in the CK) and the highest activity of POD and CAT was detected in S5 (1.5 times and 2.1 times, respectively higher than that in the CK). **Conclusion:** Inoculation with different organophosphate-solubilizing bacteria or compound bacteria can promote the growth and development of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* and improve its resistance to stresses. The combination of *B. mycooides* and *B. proteolyticus* and the combination of the three achieved the have the best effect. This study provides a reference for the selection of bacterial fertilizers for artificial cultivation of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*.

[Keywords] *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*; organophosphate-solubilizing bacteria; photosynthesis; physiological and biochemical properties; compound bacteria

滇重楼(*Paris polyphylla* var. *yunnanensis*)是百合科重楼属多年生草本植物^[1],作为云南道地中药材,主要以干燥根茎入药,具有抗肿瘤、清热解毒、镇静止痛等功效^[2-4]。目前滇重楼的市场需求量剧增,导致野生滇重楼被过度采挖,而滇重楼繁殖率低下,药用部位自然生长十分缓慢,从而制约了相关制药产业的可持续发展^[5]。人工种植滇重楼已成为解决市场供需矛盾,实现滇重楼的有效保护和可持续利用的唯一途径。

磷元素是植物生长发育必不可少的元素,能加强光合作用和碳水化合物的合成与转运,促进蛋白质合成,加快脂肪代谢,还能增强作物的抗旱、抗寒和抗病的能力^[6]。由于固定化作用,土壤中的磷元素大多以难溶性化合物的形式存在,很难被植物直接吸收利用,全国约有40%的耕地缺乏磷元素。施用磷肥虽然能一定程度上缓解植物缺磷的现象,但磷肥中75%~90%的磷都会很快被吸附到土壤颗粒表面或与土壤中的金属离子(铁、铝、钙等)结合生成难溶性的磷酸盐,此外,大量施用磷肥还容易因养分流失而出现土壤养分比例失调、肥效下降、土壤板结及退化等问题,对生态环境造成很大破坏^[7-8]。有研究发现,土壤中存在许多解有机磷细菌,这些解有机磷细菌能矿化有机磷化合物,使土壤中难溶性的有机磷化合物转化为能被植物直接吸收利用的磷元素^[9],大大缓解了植物缺磷的现象。还有研究表明,接种解有机磷细菌不仅可以促进植物体内磷、铜和铁的含量^[10-12],还能促进干物质的累

积^[13],因此,解有机磷细菌具有加强植物体对磷元素的吸收利用和促进生长发育的双重作用^[14]。目前,利用植物和解有机磷细菌的相互作用来调节植物的生长发育已成为当下研究的热点,许多国内外学者研究了解磷菌对植物的促生效应^[10-12,15],但研究的菌种多以解无机磷菌为主,且研究对象大多是农作物,很少涉及到对中药材的研究。赵晶晶等^[16]虽讨论了不同剂量的解磷菌对滇重楼生长发育的影响,但对不同种类的解有机磷细菌或复合菌对滇重楼生长发育的影响还未见报道。

本研究采取室内盆栽的方式进行,选取课题组前期保留的3株解有机磷细菌优势种^[17],将其各种搭配组合后接种于滇重楼幼苗中,从滇重楼叶片的光合特性和生理生化指标的变化来观察解有机磷细菌对滇重楼生长发育的影响,以期寻找出滇重楼人工栽培所需的最佳解有机磷菌种或复合菌种,为解有机磷细菌在滇重楼生产上的应用提供参考依据。

1 材料

1.1 供试材料 供试种苗为同一批大小一致,且无病虫害的四年生滇重楼实生苗,由云南省大理州永平县杉阳镇普棚村规范化种植基地(25°39'13.56''N, 99°33'58.38''E)提供,滇重楼实生苗采用单株保存,常规处理以保证种质资源的稳定性和均一性,并经保山中医药高等专科学校杨发建副教授鉴定;栽培基质为普通黄壤土、沙土和有机肥按2:1:1的比例配制而成,过2 mm筛,采用高压蒸气灭菌锅

121 °C高温灭菌30 min,取出冷却密封放置待用;供试菌株为课题组前期从滇重楼根际土壤中分离筛选出的3株溶磷效果最佳的解有机磷细菌,分别为运动芽孢杆菌(*Bacillus mycoides*)、维德曼芽孢杆菌(*B. wiedmannii*)、蛋白水解芽孢杆菌(*B. proteolyticus*),活化后,用移液枪取少量菌液接种于装有50 mL牛肉膏蛋白胨液培养基的锥形瓶中培养,每种解有机磷细菌菌种培养约4 L。

1.2 仪器和试剂 GI54DWS型高压蒸汽灭菌锅(致微仪器有限公司);SPX-80型生化培养箱(上海跃进医疗器械有限公司);THZ-82B型气浴恒温振荡器(金坛市精达仪器制造有限公司);ME204型电子天平(梅特勒-托利多仪器有限公司);752型紫外-可见分光光度计(上海菁华仪器有限公司);SB-5200DTN型超声波清洗机(宁波新芝生物科技股份有限公司);GT10-1型高速台式离心机(北京时代北利离心机有限公司);HSY-26型电热恒温水浴锅(上海跃进医疗器械有限公司);GFS-3000型便携光合作用仪(德国WALZ公司);CI-203型便携式激光叶面积仪(美国CID公司)。水为怡宝纯净水,试剂均为分析纯。

2 方法

2.1 试验设计 试验采用室内盆栽的方法,于2020年12月在贵州省安顺市安顺学院(26°24'95.21"N, 105°90'75.95"E)的试验种植基地进行种植,盆栽容器为口径15 cm、高20 cm的塑料花盆,试验前采用无水乙醇擦拭3次。试验共分为8组,包括7个试验处理(S1~S7)组和1个空白(CK)组,实验处理组对3种解有机磷细菌优势种采取单株接种、两两组合接种以及3种菌混合接种的方式分组培养,S1组接种菌株*B. mycoides*、S2组接种菌株*B. wiedmannii*、S3组接种菌株*B. proteolyticus*、S4组接种菌株*B. mycoides*和*B. wiedmannii*、S5组接种菌株*B. mycoides*和*B. proteolyticus*、S6组接种菌株*B. wiedmannii*和*B. proteolyticus*、S7组接种菌株*B. mycoides*、*B. wiedmannii*和*B. proteolyticus*,CK组不接种处理。每组重复种植10盆,每盆种植5株生长状况良好的滇重楼实生苗,菌悬液接种量为150 mL/盆,栽培期间按照滇重楼植株室内栽培进行常规管理。

2.2 测定指标及方法 种植8个月后,待滇重楼叶片长势最佳时,选取一个阳光充足的天气(11:00~13:00),待叶片气孔张开度达到最大值时,每组随机选取3盆,每盆选择1片长势良好且无病虫害的

植物叶片,在不摘取叶片的条件下,采用便携式激光叶面积仪测定该叶片的叶面积,重复测定3次,再采用光合作用仪,参照赵昕等^[18]的方法测定同一片滇重楼叶片的气体交换参数。最后,摘取同一株滇重楼植株叶片测定其生理生化指标。

采用舒展等^[19]的方法测定滇重楼叶片的光合色素含量,测定过程需全程避光处理;采用硫代巴比妥酸比色法^[20]测定叶片中丙二醛(MDA)和可溶性糖的含量;采用考马斯亮蓝G250比色法^[20]测定叶片中可溶性蛋白的含量;采用氮蓝四唑光化学还原法^[21]测定叶片中超氧化物歧化酶(SOD)活性,以抑制NBT光化还原50%为1个酶活力单位U;采用愈创木酚法^[22]测定叶片中过氧化物酶(POD)活性,将每分钟吸光度 A 增加0.01定义为1个酶活力单位U;采用紫外分光光度法^[22]测定叶片中过氧化氢酶(CAT)活性,以 $A_{240\text{nm}}$ 每下降0.1为1个酶活力单位U。

2.3 数据处理 采用Microsoft Excel 2010和SPSS 22.0软件处理数据和做图。

3 结果

3.1 接种不同解有机磷细菌对滇重楼叶片叶面积和光合作用的影响 接种不同解有机磷细菌对滇重楼叶片叶面积大小的影响见表1。与不接种的CK组比较,所有处理组中滇重楼叶片的叶面积均明显高于CK组($P<0.05$),且随着接种菌种数的不同,叶面积大小呈现出显著变化,而接种相同菌种数的处理组之间差异无统计学意义,叶面积最大的为3种菌混合处理S7组,是CK组的2.8倍,其次是2种菌混合处理的S4~S6组。

由表1可以看出,在相同生境中,接种不同解有机磷细菌或复合菌对滇重楼叶片光合作用呈现出了不同的差异性,除S1组的净光合速率外,其余处理组的 P_n 、 G_s 、 T_r 、 C_i 均高于CK组,且大都与CK组呈现出显著差异性。其中S6组的 P_n 、 G_s 和 T_r 最大,是CK组的2~3倍,S7组的 C_i 最大,是CK组的1.2倍。

3.2 接种不同解有机磷细菌对滇重楼叶片光合色素含量的影响 与不接种的CK组比较,接种不同解有机磷细菌的S1~S7组滇重楼叶片中的叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素以及类胡萝卜素含量都有明显的增加,且大部分差异均存在统计学意义($P<0.05$),表明在相同的生境中,混合接种不同解有机磷细菌对滇重楼叶片光合色素的影响存在较大差异。从叶绿素a/b的结果可以看出,除了S1和S2组外,其余组都>CK组,且大部分差异不具有统计学

表1 接种不同解有机磷细菌对滇重楼叶片叶面积及光合参数的影响 ($\bar{x}\pm s, n=10$)

Table 1 Effect of inoculation with different organophosphate-solubilizing bacteria on leaf area and photosynthetic parameters of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* leaves ($\bar{x}\pm s, n=10$)

组别	叶面积/cm ²	净光合速率(P_n) / $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	气孔导度(G_s) / $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	蒸腾速率(T_r) / $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	胞间CO ₂ 浓度(C_i) / $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
CK组	15.031±0.066 ^d	3.109±0.227 ^{de}	15.090±0.010 ^g	0.649±0.010 ^g	322.772±0.023 ^d
S1组	20.840±0.056 ^c	2.105±0.320 ^e	23.706±0.007 ^d	1.049±0.007 ^c	366.192±0.012 ^c
S2组	19.468±0.042 ^c	3.500±0.486 ^{cd}	24.734±0.040 ^c	0.909±0.038 ^d	382.141±0.029 ^b
S3组	19.733±0.041 ^c	3.767±0.065 ^{bcd}	19.704±0.019 ^e	0.815±0.020 ^e	384.435±0.007 ^b
S4组	26.859±0.059 ^b	4.676±0.157 ^{bc}	30.122±0.004 ^b	1.241±0.004 ^b	379.975±0.010 ^b
S5组	25.789±0.025 ^b	3.772±0.176 ^{bcd}	17.326±0.054 ^f	0.667±0.054 ^g	393.568±0.013 ^a
S6组	27.110±0.015 ^b	6.700±0.154 ^a	45.459±0.003 ^a	1.875±0.003 ^a	379.147±0.008 ^b
S7组	42.006±0.012 ^a	4.850±0.074 ^b	17.612±0.065 ^f	0.761±0.066 ^f	397.233±0.004 ^a

注:每组同列不同的小写字母代表 $P<0.05$ (表2同)

意义。从单接种菌S1~S3组可以看出,除叶绿素a/b,几种光合色素含量大小依次为S1组>S2组>S3组,可能是由3种解有机磷细菌的溶磷效果不同导致。两种菌混合接种组(S4~S6组)中,光合色素含量大小依次为S6组>S4组>S5组,原因可能是

*B. mycooides*和*B. wiedmannii*这两种菌混合接种后产生了拮抗作用。在所有处理组中,3种菌混合接种组(S7组)的所有光合色素含量均为最大值,约为CK组含量的2~4倍,表明3种菌混合接种能大大提高滇重楼叶片的捕光能力。见表2。

表2 接种不同解有机磷细菌对滇重楼叶片光合色素含量的影响 ($\bar{x}\pm s, n=10$)

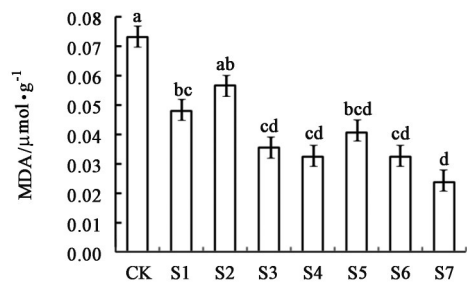
Table 2 Effect of inoculation with different organophosphate-solubilizing bacteria on content of photosynthetic pigments in leaves of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* ($\bar{x}\pm s, n=10$)

组别	叶绿素a含量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	叶绿素b含量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	叶绿素a/b	总叶绿素含量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	类胡萝卜素含量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$
CK组	0.540±0.017 ^f	0.182±0.079 ^f	2.979±0.065 ^c	0.721±0.032 ^f	0.249±0.020 ^f
S1组	1.594±0.003 ^c	0.571±0.020 ^a	2.791±0.018 ^c	2.165±0.007 ^c	0.505±0.014 ^a
S2组	1.241±0.007 ^c	0.432±0.032 ^c	2.876±0.025 ^c	1.672±0.014 ^d	0.436±0.010 ^c
S3组	0.887±0.008 ^f	0.250±0.041 ^e	3.550±0.032 ^b	1.137±0.015 ^e	0.261±0.016 ^c
S4组	1.679±0.006 ^b	0.468±0.036 ^b	3.591±0.029 ^b	2.147±0.012 ^c	0.464±0.014 ^b
S5组	1.314±0.013 ^d	0.320±0.069 ^d	4.122±0.072 ^a	1.633±0.015 ^d	0.345±0.021 ^d
S6组	1.695±0.006 ^b	0.559±0.043 ^a	3.034±0.038 ^c	2.254±0.015 ^b	0.502±0.021 ^a
S7组	1.912±0.005 ^a	0.566±0.027 ^a	3.380±0.022 ^b	2.478±0.010 ^a	0.507±0.011 ^a

3.3 接种不同解有机磷细菌对滇重楼叶片MDA含量的影响 各处理组滇重楼叶片中MDA含量均低于不接种的CK组,且与CK组差异具有统计学意义($P<0.05$),表明接种解有机磷细菌对滇重楼叶片中MDA含量影响较大。2种菌种混合接种的S4~S6组叶片内的MDA含量整体上较单种菌接种的S1~S3组少,只有S5组稍高于S3组。S7组中滇重楼叶片MDA含量达到了最低值,仅为CK组的1/3左右。见图1。

3.4 接种不同解有机磷细菌对滇重楼叶片渗透调节物质的影响

3.4.1 可溶性糖含量 除S3和S5组外,其他处理



注:图中不同字母表示差异具有统计学意义($P<0.05$)(图2-图6同)

图1 接种不同解有机磷细菌对滇重楼叶片MDA含量的影响 ($\bar{x}\pm s, n=10$)

Fig. 1 Effect of inoculation with different organophosphate-solubilizing bacteria on MDA content in leaves of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* ($\bar{x}\pm s, n=10$)

组滇重楼叶片中的可溶性糖含量不同程度的高于CK组,这说明单接种 *B. proteolyticus* 及混合接种 *B. mycoides* 和 *B. wiedmannii* 这两种解有机磷细菌对滇重楼叶片中可溶性糖的合成具有抑制作用;而S7组可溶性糖含量最高,是CK组的2.1倍,这说明3种菌混合接种能显著促进滇重楼叶片可溶性糖的合成,而S2组、S4组和S6组这3组的含量差异无统计学意义,表明这3种处理后的效果大致相当。见图2。

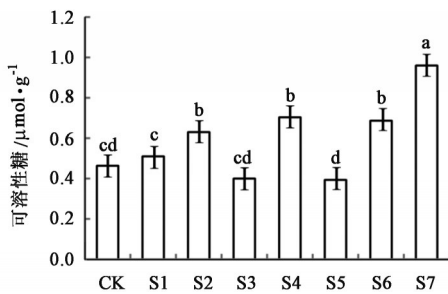


图2 接种不同解有机磷细菌对滇重楼叶片可溶性糖含量的影响 ($\bar{x}\pm s, n=10$)

Fig. 2 Effect of inoculation with different organophosphate-solubilizing bacteria on soluble sugar content in leaves of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* ($\bar{x}\pm s, n=10$)

3.4.2 可溶性蛋白含量 试验处理组中滇重楼叶片的可溶性蛋白含量均不同程度高于CK组,接种复合菌的S4~S7组明显高于单接种菌株的S1~S3组 ($P<0.05$),且单接种菌株对滇重楼叶片可溶性蛋白含量的影响较小。而在接种复合菌组中,2种混合接种和3种混合接种对可溶性蛋白含量的影响差异具有统计学意义 ($P<0.05$),总体上S7组中的可溶性蛋白含量最高,是CK组的2.2倍。见图3。

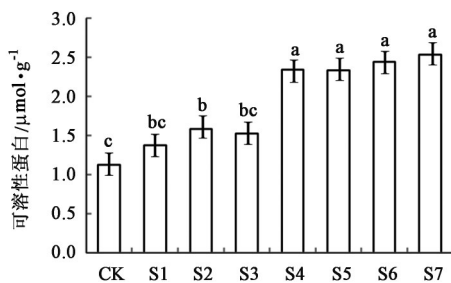


图3 接种不同解有机磷细菌对滇重楼叶片可溶性蛋白含量的影响 ($\bar{x}\pm s, n=10$)

Fig. 3 Effect of inoculation with different organophosphate-solubilizing bacteria on soluble protein content of leaves of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* ($\bar{x}\pm s, n=10$)

3.5 接种不同解有机磷细菌对滇重楼叶片抗氧化酶活性的影响

3.5.1 SOD活性 除S1组外,其他处理组的SOD

活性均不同程度的高于CK组,且与CK组之间差异具有统计学意义 ($P<0.05$),2种菌混合处理的S4~S6组SOD活性较1种菌处理S1~S3组和3种菌混合处理的S7组高,其中活性最高的是S6组,即为接种菌株 *B. wiedmannii* 和 *B. proteolyticus* 的组,是CK组的2.9倍,其次是S5组,即为接种菌株 *B. mycoides* 和 *B. proteolyticus* 的组,且两种接种方式差异无统计学意义。见图4。

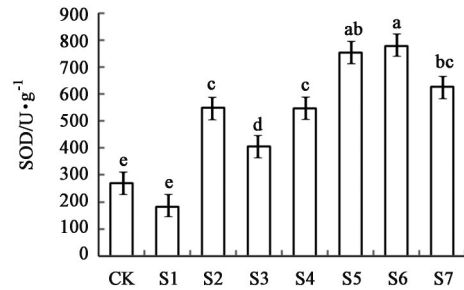


图4 接种不同解有机磷细菌对滇重楼叶片SOD活性的影响 ($\bar{x}\pm s, n=10$)

Fig. 4 Effect of inoculation with different organophosphate-solubilizing bacteria on SOD activity in leaves of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* ($\bar{x}\pm s, n=10$)

3.5.2 POD活性 S1、S4和S6组的POD活性低于CK组,而其余处理组均不同程度的高于CK组,活性最高的是S5组,是CK组的1.5倍,且与其他组差异具有统计学意义 ($P<0.05$),所有处理组与CK组比较差异均具有统计学意义 ($P<0.05$),表明接种不同的解有机磷细菌将不同程度的影响滇重楼叶片中POD活性。见图5。

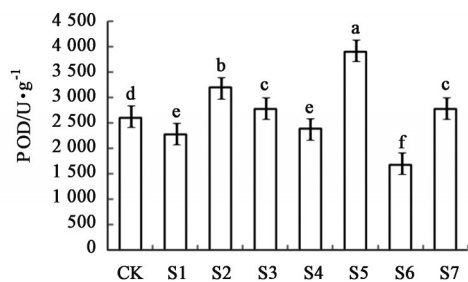


图5 接种不同解有机磷细菌对滇重楼叶片POD活性的影响 ($\bar{x}\pm s, n=10$)

Fig. 5 Effect of inoculation with different organophosphate-solubilizing bacteria on POD activity in leaves of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* ($\bar{x}\pm s, n=10$)

3.5.3 CAT活性 不同解有机磷细菌处理的CAT活性与CK组比较均表现为促进作用,且处理组与CK组比较差异均具有统计学意义 ($P<0.05$),表明施加解有机磷细菌对滇重楼叶片CAT活性影响较大,其中CAT活性最大的是S5组,即为接种 *B. mycoides*

和 *B. proteolyticus* 组, 是 CK 组的 2.1 倍, 其次为 3 种菌混合处理的组, 且两种接种方式差异无统计学意义。见图 6。

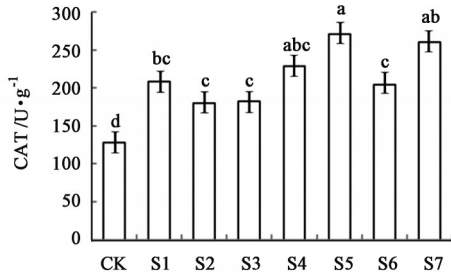


图6 接种不同解有机磷细菌对滇重楼叶片CAT活性的影响 ($\bar{x} \pm s$, $n=10$)

Fig. 6 Effects of inoculation with different organophosphate-solubilizing bacteria on CAT activity in leaves of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* ($\bar{x} \pm s$, $n=10$)

4 讨论

光合作用是植物积累营养物质的主要途径, 叶片是进行光合作用的主要器官, 叶面积大小能够反应植物的受光面积, 进而影响其光合作用强度, 此外, 叶面积还能初步反映植物的生长发育状况, 在相同生境中, 同种植物叶片越大, 则初步表明该植物生长发育状况越好。在本研究中, 所有处理组的叶面积均明显高于不接种的 CK 组, 叶面积最大的是 S7 组, 说明接种解有机磷细菌能加快滇重楼叶片的生长速度, 3 种菌混合接种的效果最佳。光合参数能影响植物光合作用能力的大小, 光合作用的顺利进行离不开 G_s 、 T_r 和 C_i 等因素的协同作用。通常认为气孔关闭导致的气孔限制和叶肉细胞光活性下降导致的非气孔限制是光合速率下降的主要因素^[23-24], 当 P_n 、 G_s 和 C_i 同时下降时, 认为是气孔限制导致的光合效率下降, 反之, 当 P_n 下降, 而 C_i 上升或不变时, 则认为是非气孔限制导致^[25-26]。本研究中, 各处理组的 P_n 、 G_s 、 T_r 和 C_i 值都高于 CK 组, 由此可推测接种解有机磷细菌或复合菌能提高光合速率且不受气孔限制的影响。光合色素也是光合作用必不可少的影响因素, 可以捕获光能, 再将光能转化为化学能, 供植物生长发育利用^[27-28]。本研究中, 与 CK 组比较, 所有处理组滇重楼叶片中的叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素及总叶绿素均有不同程度的提高, 光合色素含量最高为 S7 组, 表明接种解有机磷细菌能够增强滇重楼光合作用, 进而为滇重楼生长发育和物质积累奠定基础。

MDA 是细胞质过氧化作用的产物, 其含量越低, 细胞膜内系统越稳定, 细胞内的生理活性越高,

则植株生长越好^[16]。本研究结果可以看出, 接种解有机磷细菌后, 滇重楼叶片中的 MDA 都有了明显的下降, 特别是 3 种菌混合接种后对 MDA 含量影响最为明显。可溶性糖和可溶性蛋白常作为渗透调节物质影响着植物细胞膜的结构与功能^[28], 本研究发现, 与 CK 组比较, 大部分接种解有机磷细菌的处理组, 其可溶性糖的含量高于 CK 组, 所有处理组的可溶性蛋白含量均明显高于 CK 组, S7 组的可溶性糖和可溶性蛋白含量最高。SOD、POD 和 CAT 是植物体内主要的抗氧化酶, 其活性大小是衡量植物抗逆性的重要指标, 活性越大, 表明植物抗逆性越强^[29-30], 当植物受到外界环境的胁迫后, 这些抗氧化酶则会清除体内的活性氧, 从而将对自身的伤害降到最低^[31-32]。本研究中可看出, 接种解有机磷细菌后, 大部分滇重楼叶片内的 SOD 和 POD 活性都有所提高, 所有处理组的 CAT 活性都有了提高, 其中活性最高的两组分别是 S5 和 S7 组。总的来看, 接种解有机磷细菌可以降低滇重楼植株叶片内 MDA 的积累以减弱膜脂过氧化; 增加可溶性糖和可溶性蛋白含量以维持细胞膜渗透平衡; 增加体内抗氧化酶的活性, 以提高其对环境的抗逆性。

综上所述, 接种不同解有机磷细菌或复合菌, 能不同程度加快滇重楼的生长速度, 增强滇重楼叶片的光合作用及提高对环境的抗逆能力。综合上述结果可以看出, 混合接种 *B. mycoides* 和 *B. proteolyticus* (S5 组) 及 3 种菌混合接种 (S7 组) 这两种方式对滇重楼的影响效果最佳, 因此, 可考虑将这两种解有机磷细菌的接种方式应用到滇重楼大规模人工种植过程中, 既可以提高滇重楼的生产效益, 又可以合理保护生态环境。

[利益冲突] 本文不存在任何利益冲突。

[参考文献]

- [1] 赵晶晶, 李卓蔚, 许凌峰, 等. 根际促生菌剂对滇重楼生理特性及无机元素的影响[J]. 中国实验方剂学杂志, 2022, 28(2): 166-174.
- [2] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 一部[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2015: 260.
- [3] 赵晶晶, 李卓蔚, 许凌峰, 等. 核桃凋落叶分解对滇重楼生理特性及药用品质的影响[J]. 生态学杂志, 2021, 40(12): 3982-3989.
- [4] 晏秀祥, 潘齐冬, 孙浩云, 等. 滇重楼民族民间应用及传统功效的物质基础研究[J]. 中国中药杂志, 2021, 46(24): 6343-6352.
- [5] 张海珠, 李杨, 张彦如, 等. 菌根真菌处理下滇重楼对

- 营养元素的吸收和积累[J]. 环境化学, 2019, 38(3): 615-625.
- [6] 储成才, 王毅, 王二涛. 植物氮磷钾养分高效利用研究现状与展望[J]. 中国科学: 生命科学, 2021, 51(10): 1415-1423.
- [7] 沈佳佳, 侯小改, 王二强, 等. 油用牡丹根际解有机磷细菌的筛选及解磷功能研究[J]. 生物技术通报, 2022, doi: 10. 13560/j. cnki. biotech. bull. 1985. 2021-0942.
- [8] 武志海, 刘晶晶, 杨美英, 等. 外源溶磷菌对不同土壤条件下大豆生长特性的影响[J]. 大豆科学, 2017, 36(1): 78-86.
- [9] 秦利均, 杨永柱, 杨星勇. 土壤溶磷微生物溶磷、解磷机制研究进展[J]. 生命科学研究, 2019, 23(1): 59-64, 86.
- [10] HAMEEDA B, HARINI G, RUPELA O P, et al. Growth promotion of maize by phosphate-solubilizing bacteria isolated from composts and macrofauna [J]. Microbiol Res, 2008, 163(2): 234-242.
- [11] RAJ J, BAGYARAJ D J, MANJUNATH A. Influence of soil inoculation with vesicular-arbuscular mycorrhiza and a phosphate dissolving bacterium on plant growth and 32p-up take [J]. Soil Biol Biochem, 1981, 13(1): 105-108.
- [12] BASHAN Y, KAMNEV A A, DE-BASHAN L E. Tricalcium phosphate is inappropriate as a universal selection factor for isolating and testing phosphate-solubilizing bacteria that enhance plant growth: A proposal for an alternative procedure [J]. Biol Fertility Soils, 2013, 49(4): 465-479.
- [13] KOBUS J. The distribute on of microorganisms mobilizing phosphorus in different soils [J]. Acta Microbiol Polonica, 1962, 11(7): 255-264.
- [14] YADAV B K, TARAFDAR J C. *Penicillium purpurogenum*, unique P mobilizers in arid agroecosystems [J]. Arid Soil Res Rehabilit, 2011, 25(11): 87-99.
- [15] 白文娟, 胡蓉蓉, 章家恩, 等. 溶磷菌对玉米苗期生长和磷素吸收的影响 [J]. 生态科学, 2014, 33(3): 401-407.
- [16] 赵晶晶, 郭冬琴, 杨敏, 等. 不同剂量解磷菌对滇重楼生长发育的影响 [J]. 环境化学, 2022, 41(2): 761-769.
- [17] 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.
- [18] 赵昕, 宋瑞清, 阎秀峰. 接种 AM 真菌对喜树幼苗生长及光合特性的影响 [J]. 植物生态学报, 2009, 33(4): 783-790.
- [19] 舒展, 张晓素, 陈娟, 等. 叶绿素含量测定的简化 [J]. 植物生理学通讯, 2010, 46(4): 399-402.
- [20] 熊庆娥. 植物生理学实验教程 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2003: 85, 126-127.
- [21] GIANNOPOLITIS C N, ROES S K. Superoxide dismutases. I. occurrence in high plants [J]. Plant Physiol, 1977, 59(2): 309-314.
- [22] 高俊凤. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 214-215, 217-218.
- [23] 周光良, 胡庭兴, 吴张磊, 等. 核桃凋落叶分解对菠菜生长和生理特性的影响 [J]. 应用与环境生物学报, 2015, 21(4): 777-782.
- [24] 许大全. 光合作用气孔限制分析中的一些问题 [J]. 植物生理学通讯, 1997, 33(4): 241-244.
- [25] FARQUHAR G D, SHARKEYT D. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. Annu Rev Plant Physiol, 1982, 33: 317-345.
- [26] 赵顺, 黄秋娴, 李玉灵, 等. 遮荫处理对臭柏幼苗光合特性的影响 [J]. 生态学报, 2014, 34(8): 1994-2002.
- [27] 马晓东, 李霞, 刘俊祥, 等. 多环芳烃(PAHs)污染土壤中接种平滑白蛋巢菌对蒿柳光合作用的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(5): 80-87.
- [28] 黎海灵, 郭冬琴, 杨敏, 等. 不同丛枝菌根真菌组合对滇重楼光合生理和化学成分的影响 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2021, 27(7): 134-143.
- [29] 任禛, 夏体渊, 陈丽娟, 等. 不同丛枝菌根真菌对玉米生理相关指标的影响 [J]. 西南农业学报, 2015, 28(2): 563-568.
- [30] 刘耀臣, 王震, 王策, 等. 丛枝菌根真菌对盐胁迫下芹菜生长和生理指标的影响 [J]. 北方园艺, 2019(18): 47-51.
- [31] 魏玮. 植物内生真菌对镉和盐胁迫下水稻幼苗缓解作用的研究 [D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2017.
- [32] 李晓曼, 王建军. 丛枝菌根真菌对镍胁迫桂花幼苗光合作用及抗氧化酶活性的影响 [J]. 江苏农业科学, 2019, 47(21): 223-227.

[责任编辑 顾雪竹]