

根际促生菌剂对滇重楼生理特性及无机元素的影响

赵晶晶¹, 李卓蔚¹, 许凌峰¹, 郭冬琴¹, 黎海灵¹, 周浓^{1*}, 顿宝庆^{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 404120; 2. 中国农业科学院 作物科学研究所, 北京 100081)

[摘要] 目的:研究接种不同根际促生菌剂(PGPR)对滇重楼幼苗的生长发育和入药品质的影响,为培育优质滇重楼药材提供参考。方法:通过室温盆栽接种试验方法,采用单因素完全随机设计,研究了5种不同PGPR对滇重楼生理特性及无机元素的影响。结果:接种外源不同PGPR可以不同程度地促进滇重楼的生长发育,延缓叶片的衰老,提高新根茎和老根茎的药用价值。其中,与未接种空白相比,外源接种复合微生物菌肥(FH)和三炬灌金液(SJ)可以增加根系活力及叶片内光合色素含量,增强叶片内的抗氧化酶活性[超氧化物歧化酶(SOD),过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)],减少叶片中丙二醛(MDA)的产生,其减少幅度依次为10.46%~39.62%和20.99%~53.12%,随着生育进程的推进,MDA的抑制率逐渐增加,这有效地延缓了滇重楼叶片的衰老。此外,外源接种不同PGPR可以不同程度地增加新根茎和老根茎内营养元素含量,降低重金属元素含量,提高了滇重楼根茎的药用价值。结论:FH和SJ对滇重楼幼苗生长的促进作用及根茎药用价值的调控效果最佳,为PGPR在滇重楼上的应用推广提供了参考依据。

[关键词] 滇重楼; 植物根际促生菌; 生理特性; 营养元素; 重金属元素

[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)02-0166-09

[doi] 10.13422/j.cnki.syfjx.20211517

[网络出版地址] <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3495.R.20211101.1819.001.html>

[网络出版日期] 2021-11-02 13:35

Effects of Plant Growth-promoting Rhizobacteria on Physiological Characteristics and Inorganic Elements in *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*

ZHAO Jing-jing¹, LI Zhuo-wei¹, XU Ling-feng¹, GUO Dong-qin¹, LI Hai-ling¹,
ZHOU Nong^{1*}, DUN Bao-qing^{2*}

(1. 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;

2. Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

[Abstract] **Objective:** To study the effects of different plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) on the growth of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* seedlings and the quality of its medicinal parts, in order to provide reference for the cultivation of high-quality *P. polyphylla* var. *yunnanensis*. **Method:** The pot culture experiment at room temperature and the single-factor completely random design were employed for exploring the effects of five PGPR on physiological characteristics and inorganic elements of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*. **Result:** The results showed that the exogenous inoculation of different PGPR promoted the growth and

[收稿日期] 20210828(006)

[基金项目] 国家自然科学基金项目(81260622);“成渝地区双城经济圈建设”科技创新项目(KJCX2020046);重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202101239)

[第一作者] 赵晶晶,博士,讲师,从事药用植物栽培学与耕作学研究,E-mail:nl140828@163.com

[通信作者] *周浓,硕士,教授,从事药用植物栽培与质量控制研究,Tel:023-58576130,E-mail:erhaizn@126.com;

*顿宝庆,博士,研究员,从事微生物自然代谢产物多样性筛选研究,Tel:010-82108746,E-mail:dunbaoqing@caas.cn

development of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* to varying degrees, delayed the senescence of leaves, and improved the medicinal value of new and old rhizomes. Compared with the non-inoculated control, the exogenous inoculation of compound microbial fertilizer (FH) and microbial agent Sanju Guanjin liquid (SJ) enhanced the root vigor, increased the content of photosynthetic pigments and the activities of anti-oxidant enzymes [superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), and peroxidase (POD)], and reduced the content of malondialdehyde (MDA) in leaves. Their inhibition rates against MDA were 10.46%-39.62% and 20.99%-53.12%, respectively. With the growth of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*, the inhibition rate against MDA gradually increased, which effectively delayed the senescence of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* leaves. In addition, the exogenous inoculation of different PGPR promoted the accumulation of nutrient elements in new and old rhizomes, lowered the heavy metal content to varying degrees, and improved the medicinal value of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* rhizomes. **Conclusion:** FH and SJ have exhibited the best promoting effect on the growth of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* seedlings and also the best regulatory effect on the medicinal value of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* rhizomes, which has provided reference for the application and promotion of PGPR in the growth of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*.

[Keywords] *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*; plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR); physiological characteristics; nutrient; heavy metal elements

滇重楼为百合科多年生草本植物,其干燥根茎为一种清热解毒名贵中药材,具有清热解毒、凉肝定惊和消肿止痛的功效,是红药、宫血宁胶囊、云南白药、热毒清等多种中成药的主要原料。市场上的重楼药材多年以来主要依赖于野生采挖,自然条件下滇重楼繁殖率一直较低,其药用部位根状茎的生长十分缓慢,导致野生资源几近枯竭,故人工种植对缓解滇重楼野生资源变少就变得尤为重要,这也是实现野生资源有效保护和滇重楼资源可持续利用的必由之路^[1-2]。

植物根际促生菌(PGPR)是指可促进植物生长及对矿质营养利用和吸收,而对有害微生物有较强拮抗的一类附生于植物根际的有益菌^[3]。关于PGPR发挥作用的机制主要包括以下3个方面:①PGPR接种到土壤中可以产生赤霉素、吲哚乙酸和玉米素等植物促生物质,来促进植物的生长发育^[4];②对病害的生物调控,外源接种PGPR可以改变微生物环境平衡,促进植物的生长^[5];③PGPR能够改善植物根际环境,加快植物根际促生菌旺盛的代谢速度,促进土壤中有有机物质的分解,增强植物营养元素的矿化和营养供应^[6-7]。基于其促生特性,PGPR被发展为微生物肥料而广泛应用于农业生产中,用来替代部分化肥的使用^[5],农业生产上施用PGPR不仅能改善土壤理化性质,还能促进植物生长、提高植物产量,改善植物品质。植物生长过程中接种单一联合固氮菌接种剂(Y16)可以显著增加箭筈豌豆地上生物量(104.50%)和地下生物量

(254.10%);接种溶磷菌+联合固氮菌+根瘤菌复合接种剂能增加箭筈豌豆的株高、根长、根体积、根系活力和根表面积,可见,复合接种剂处理效果明显优于单一接种剂^[8]。西瓜接种7种不同的PGPR,发现固氮抗盐菌能促进根系生长和对磷元素的吸收利用;世明菌可以显著加快叶片的生长,促进植株对磷和氮元素的吸收;解淀粉芽孢杆菌能显著提高可溶性糖含量,改善西瓜的品质;枯草芽孢杆菌可显著增加叶片内叶绿素总含量;而苏云金芽孢杆菌能促进植株对钾元素的吸收利用^[9]。外源接种不同PGPR可以使雪莲叶片内的叶绿素含量增加14.77%~52.27%,其中阿氏芽孢杆菌的调控效果最佳^[10]。

目前为止,PGPR对植物生长发育的促进效应已经逐渐引起了国内外学者的重视,利用植物与土壤微生物的相互作用来调节植物根际有效养分的有效性,但有关PGPR对植物的促生效应研究多集中在箭筈豌豆^[8]、雪莲^[10]、西瓜^[9,11-12]等植物中,且研究指标主要集中在株高、生物量及无机元素等方面,而有关PGPR对滇重楼生理特性及无机元素的影响鲜见报道。本研究以接种不同PGPR为处理,研究了不同PGPR对滇重楼生理特性及无机元素的影响,以便寻找出滇重楼最适接种的PGPR,为PGPR在滇重楼生产上的应用提供理论依据。

1 材料

试验供试菌剂主要有5种:①三炬灌金液由福建三炬生物科技股份有限公司生产和提供,该菌剂

主要以有机质为载体,有效菌主要为解烟草节杆菌、胶冻样类芽孢杆菌和淀粉芽孢杆菌,有效活菌数 $\geq 2 \times 10^9$ 个/mL^[13],使用剂量为每300 g土壤加本品1 mL加水稀释至3 L;②拜沃由北京科威拜沃生物技术有限公司生产和提供,该菌剂的剂型为可湿性粉剂,有效菌主要为解磷菌、解钾菌、固氮菌和微生物菌素等,有效活菌数 $\geq 1.2 \times 10^{11}$ 个/mL^[14],使用剂量为每300 g土壤加本品1 mL加水稀释至3 L;③复合微生物菌肥由河南省强生农业科技发展有限公司生产和提供,有效菌主要为乳酸菌、芽孢杆菌、固氮菌和放线菌等,有效活菌数 $\geq 20 \times 10^9$ 个/g,使用剂量为每300 g土壤加本品1 g;④生物功能菌由广州市微元生物科技有限公司生产和提供,加入了土壤修复改良菌剂,有效菌主要为解磷菌、解钾菌、固氮菌和抗生素等,有效活菌数 $\geq 2 \times 10^{11}$ 个/g,使用剂量为每300 g土壤加本品1 g加水稀释至3 L;⑤N6-B-26美国根茂公司生产和提供,有效菌主要为丛枝泡囊菌根菌,有效活菌数 $\geq 2 \times 10^9$ 个/mL,使用剂量为每盆5 mL,加水稀释至3 L。

2 方法

2.1 试验设计 所用植株为滇重楼实生苗,经重庆三峡大学周浓教授鉴定为百合科植物滇重楼 *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*, 主要以新鲜根茎为主。采用温室盆栽试验,栽培容器为15 cm×18 cm的白色塑料花盆(用75%乙醇擦拭3遍),供试土壤取自重庆三峡学院菜园的沙壤土,是未种植过滇重楼的新土,基本理化性质为碱解氮43.50 mg·kg⁻¹,全氮1.83 g·kg⁻¹,速效氮10.64 mg·kg⁻¹,全磷0.315 g·kg⁻¹,速效磷104.66 mg·kg⁻¹,全钾28.83 g·kg⁻¹,速效钾328.64 mg·kg⁻¹,有机质21.2 g·kg⁻¹,pH 5.87。供试土壤用2 mm筛子过筛,与去除草根的干净河砂(3:1)混合作为栽培基质,置于1×10⁵ Pa,121℃高压灭菌锅内灭菌2 h,黑暗条件下保存1周后装盆,每盆装土量为16.0 kg,按钾肥0.013 g·kg⁻¹,有机肥1.33 g·kg⁻¹,钙镁磷肥0.31 g·kg⁻¹剂量充分混匀,作为基肥一次性施用。

试验采用单因素随机区组设计,设置不接种PGPR作为空白(CK)和接种PGPR处理,接种菌处理依次为三炬灌金液(SJ),拜沃(BW),复合微生物菌肥(FH),生物功能菌(GN),N6-B-26(NB),共设置6种处理方式,每处理10个重复,共60盆。每盆栽种大小基本一致的滇重楼5株,植物生长期定期浇灌Hoagland's营养液,按常规管理,光强设置为280 μmol·m⁻²·s⁻¹,光照时间为每天14 h,隔天浇水至

田间持水量70%~80%。

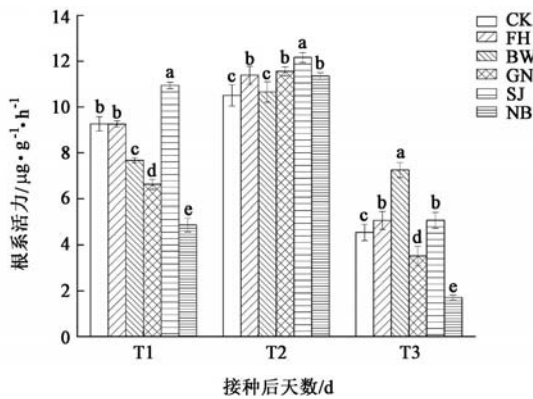
2.2 取样和测定方法 于接种后60 d(T1),90 d(T2)和120 d(T3)从每盆中随机抽取3株滇重楼的根系、叶片和根茎作为待测样品。采用2,3,5-氯化三苯基四氮唑(TTC)染色法测定根系活力^[15];采取同株同一部位的成熟叶片,进行叶片叶绿素(Chl)和类胡萝卜素(Car)含量的测定^[16],采用硫代巴比妥酸加热比色法测定丙二醛(MDA)和可溶性糖含量^[17];采用考马斯亮蓝染色法测定可溶性蛋白含量^[18];采用紫外吸收法测定过氧化氢酶(CAT)活性^[19];采用氯化硝基四氮唑蓝光化还原法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性^[20];采用愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)活性^[21]。根据原子吸收光谱法测定滇重楼新根茎和老根茎内氮,磷,钾,钙,镁,锌,砷,铜,铅,锰及镉的含量^[22],铜,铅,镉标准贮备液(购自国家环境保护总局标准样品研究所,批号分别为100609,100808,103110),其他试剂均为优级纯,水为去离子水。

2.3 数据处理 试验数据的统计采用Microsoft Excel 2003软件,方差分析采用SPSS 22.0软件,绘图采用Origin 9.0软件进行。

3 结果与分析

3.1 不同植物根际促生菌对滇重楼根系活力的影响 不同PGPR对滇重楼根系活力的调控效果不同,见图1。外源接种FH和SJ可以促进根系活力,随着生育进程的推进,FH处理的增长率依次为0.09%,8.37%和11.56%,SJ处理的增长率依次为18.08%,15.76%和11.65%,方差分析可知,除T1期FH处理外,其余处理与CK间差异具有统计学意义,从根系活力指标来看,外源接种SJ的调控效果好于FH。接种后60 d和120 d,外源接种GN和NB对根系活力起到了抑制作用,而接种后90 d,其对根系活力起到了促进作用,这说明GN和NB这2种商业微生物肥料中的主要成分接种到土壤中时需要一段适应期,导致这2种商业微生物肥料活性作用的时间较短。接种后60 d,外源接种BW对根系活力起到抑制作用,但接种后90~120 d,BW处理对根系活力起到了促进作用,其促进效果随着生育期的推进而逐渐增强,其增长幅度为1.43%~59.29%,其中T2期BW与CK间差异无统计学意义。

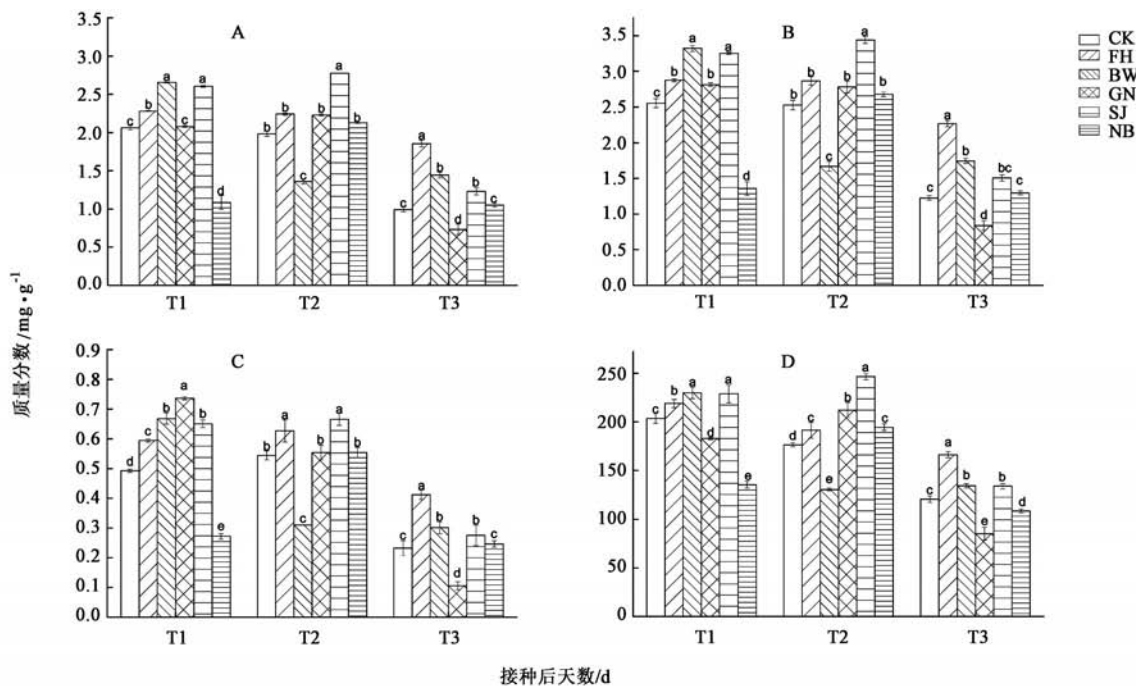
3.2 不同植物根际促生菌对滇重楼叶片光合色素含量的影响 不同PGPR对滇重楼叶片光合色素含量的调控效果不同,见图2。外源接种FH和SJ可以促进滇重楼叶片中光合色素含量的增加,随着生育



不同小写字母表示 $P < 0.05$ (图 2~5 同)

图 1 不同植物根际对滇重楼根系活力的影响 ($\bar{x} \pm s, n=10$)

Fig. 1 Effects of different plant growth-promoting rhizobacteria on root activity in *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* ($\bar{x} \pm s, n=10$)



A. 叶绿素 a; B. 叶绿素 a+b; C. 叶绿素 b; D. 胡萝卜素

图 2 不同植物根际促生菌对滇重楼叶片光合色素含量的影响 ($\bar{x} \pm s, n=10$)

Fig. 2 Effects of different plant growth-promoting rhizobacteria on photosynthetic pigment content in *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* ($\bar{x} \pm s, n=10$)

3.3 不同植物根际促生菌对滇重楼叶片衰老的影响

3.3.1 不同植物根际促生菌对滇重楼叶片MDA含量的影响 多数测定时期内,外源接种PGPR对滇重楼叶片内MDA含量起抑制作用,随着生育进程的推进,FH处理的抑制率依次为10.46%,19.73%和39.62%,SJ处理的抑制率依次为20.99%,29.30%和53.12%,经方差分析可知,处理与CK间差异具有统计学意义,MDA作为细胞膜脂过氧化作用的产物之一,其含量的降低说明了外源接种PGPR可以有

进程的推进,FH处理的Chl a含量增长率依次为10.69%,12.87%和86.79%,Chl b含量增长率依次为20.76%,15.15%和77.52%,总叶绿素(Chl a+b)含量增长率依次为12.63%,13.36%和85.03%,Car含量增长率依次为7.57%,8.53%和37.90%,方差分析可知,处理与CK间差异均具有统计学意义;SJ处理的Chl a含量增长率依次为26.37%,39.94%和23.83%,Chl b含量增长率依次为32.15%,22.31%和18.62%,Chl a+b含量增长率依次为27.48%,36.14%和22.84%,Car含量增长率依次为12.36%,39.73%和11.01%,方差分析可知,处理与CK间差异均具有统计学意义。从光合色素含量指标来看,外源接种SJ的调控效果好于FH。

效地延缓滇重楼叶片的衰老。见图3。

3.3.2 不同植物根际促生菌对滇重楼叶片可溶性蛋白和可溶性糖含量的影响 外源接种PGPR对滇重楼叶片中可溶性蛋白和可溶性糖含量起到了促进作用,与CK比较,FH处理的上述指标增长幅度依次为13.13%~35.92%和2.87%~47.06,经方差分析可知,除T3期可溶性糖含量外,其余处理与CK间差异具有统计学意义;BW处理的上述指标增长幅度依次为4.37%~12.11%和16.92%~44.72%,除T3期可溶性蛋白含量外,其余处理与CK间差异具

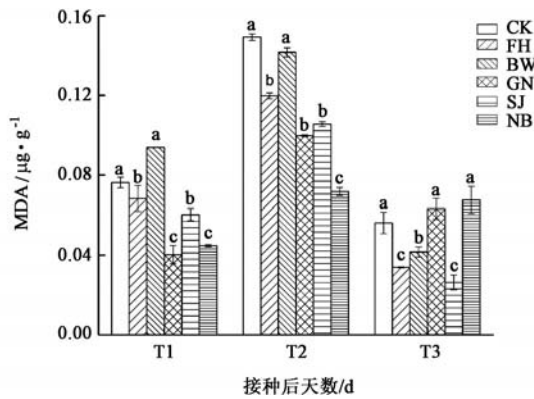


图3 不同植物根际促生菌对滇重楼MDA含量的影响 ($\bar{x} \pm s, n=10$)
Fig. 3 Effects of different plant growth-promoting rhizobacteria on MDA content in *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* ($\bar{x} \pm s, n=10$)

有统计学意义;GN处理的上述指标增长幅度依次为0.43%~22.67%和3.52%~60.49%,除T3期可溶性蛋白含量以及T1期可溶性糖含量外,其余处理与CK间差异具有统计学意义;SJ处理的上述指标增长幅度依次为8.50%~14.97%和11.76%~47.93%,方差分析可知,处理与CK间差异均具有统计学意义;NB处理的上述指标增长幅度依次为1.33%~22.86%和10.75%~33.61%,除T3期可溶性蛋白含量外,其余处理与CK间差异具有统计学意义。可见,不同PGPR对滇重楼叶片中的可溶性蛋白和可溶性糖含量均起到了一定程度的促进作用,可溶性蛋白和可溶性糖作为常见的渗透调节物质,其含量的增加有利于维持植物细胞的渗透平衡,保证了细胞膜的稳定性。见图4。

3.3.3 不同植物根际促生菌对滇重楼叶片保护酶活性的影响 外源接种PGPR对滇重楼叶片中的抗氧化酶活性(SOD,CAT和POD)起到了促进作用,整个取样过程中,FH处理的上述指标较CK的增长幅度依次为26.64%~107.64%,2.35%~49.36%和1.91%~88.28%,方差分析可知,除T2期CAT外,其余处理与CK间差异具有统计学意义;BW处理的上述指标较CK的增长幅度依次为6.96%~35.08%,4.25%~22.53%和2.25%~94.10%,经方差分析可知,除T2期POD外,其余处理与CK间的差异均具有统计学意义;GN处理的上述指标较CK的增长幅度依次为3.26%~45.42%,11.77%~25.36%和0.24%~25.71%,由方差分析可知,除T1期和T3期POD外,其余处理与CK间差异具有统计学意义;SJ处理的上述指标较CK的增长幅度依次为12.05%~84.94%,13.08%~22.78%和3.82%~69.57%,除T2期POD外,其余处理与CK间差异具有统计学意义;

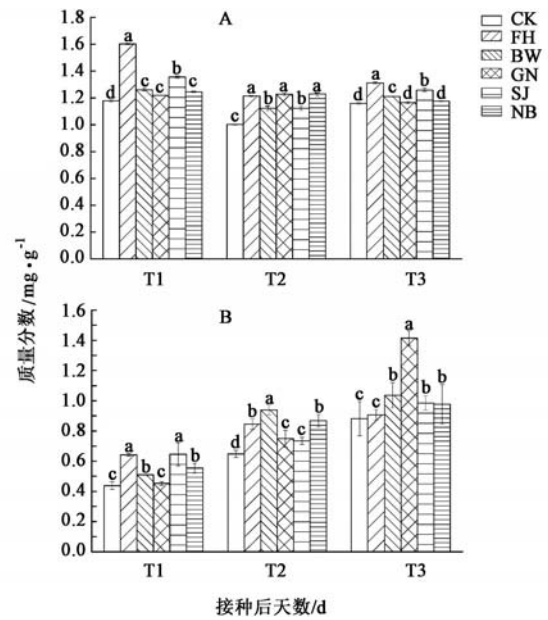
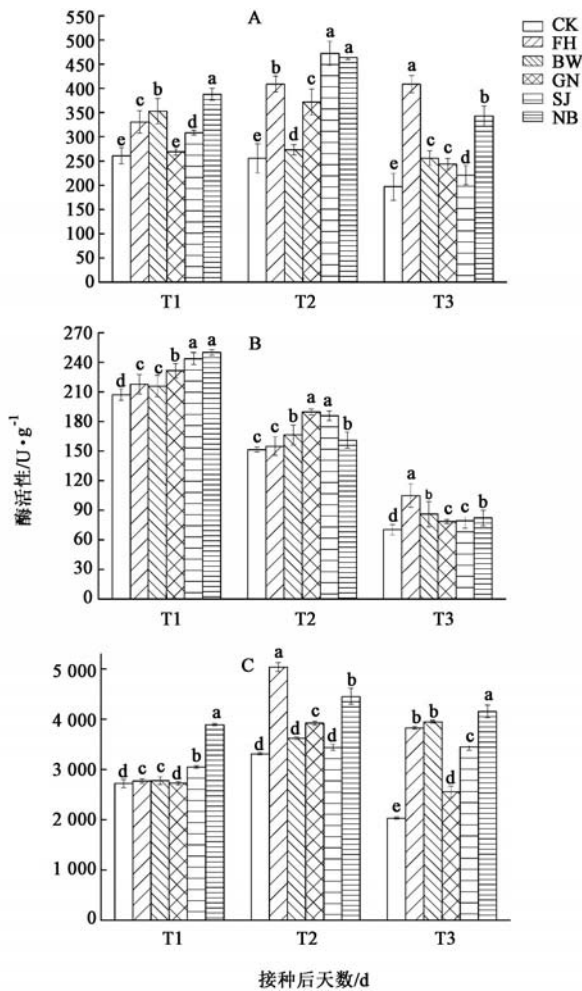


图4 不同植物根际促生菌对滇重楼可溶性蛋白(A)和可溶性糖(B)含量的影响 ($\bar{x} \pm s, n=10$)
Fig. 4 Effects of different plant growth-promoting rhizobacteria (A) on soluble protein and soluble sugar (B) content in *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* ($\bar{x} \pm s, n=10$)

NB处理的上述指标较CK的增长幅度依次为48.52%~81.36%,6.36%~20.63%和34.41%~104.25%,处理与CK间差异均具有统计学意义。

SOD,CAT和POD作为常见的抗氧化酶,其活性升高不仅可以有效地缓解逆境胁迫对植物叶片造成的氧化损伤,还可以有效地维持植物细胞内的氧化平衡,延缓植物叶片的衰老。见图5。

3.4 不同植物根际促生菌对滇重楼营养元素含量的影响 外源接种PGPR对滇重楼根茎内的营养元素含量起到了促进作用,随着生育进程的推进,新根茎和老根茎内N含量的增长幅度依次为0.05%~174.32%和8.95%~204.10%,经方差分析可知,除T1期和T3期SJ处理的新根茎内N含量外,其余处理与CK间差异均具有统计学意义;P含量的增长幅度依次为3.48%~125.57%和8.52%~123.33%,方差分析可知,除T1期和T3期SJ处理T3期FH处理的新根茎内P含量外,其余处理与CK间差异均具有统计学意义;K含量的增长幅度依次为0.18%~68.45%和1.24%~50.56%,由方差分析可知,除T1期GN处理,T2期BW和SJ处理及T3期BW,GN和SJ处理的新根茎内K含量外,其余处理与CK间差异均具有统计学意义;N,P和K作为植物必需的大量营养元素,是植物体内许多重要化合物的组分,能够参与植物体内的多种代谢过程,故根茎中N,P和K含量的高



A. SOD; B. CAT; C. POD

图5 不同促植物根际生菌对滇重楼保护酶活性的影响 ($\bar{x} \pm s$, $n=10$)

Fig. 5 Effects of different plant growth-promoting rhizobacteria on protect enzyme activities in *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* ($\bar{x} \pm s$, $n=10$)

低对植物生长有十分重要的意义。滇重楼根茎内的Ca和Zn含量可能与重楼的生肌、止血、消炎作用有关,高含量的Mg能促进抗毒素的合成,提高机体免疫力,外源接种PGPR可以促进滇重楼新根茎和老根茎内的Ca,Zn和Mg含量的增加,可见,外源接种PGPR可以有效地改善滇重楼根茎的药用价值。总体来说,PGPR对滇重楼老根茎内营养元素含量的调控效果好于新根茎。见表1。

3.5 不同植物根际促生菌对滇重楼金属元素含量的影响 外源接种PGPR可以显著降低新根茎和老根茎内的重金属元素(As,Cu,Pb和Cd)含量,其中,滇重楼新根茎内重金属元素最大质量分数依次为 $0.85 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ (T2期BW处理), $449.67 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ (T2期GN处理), $434.93 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ (T1期SJ处理)和 $49.29 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$

(T3期SJ处理),老根茎内重金属元素最大质量分数依次为 $1.20 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (T3期FH处理), $354.06 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ (T3期NB处理), $376.14 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ (T3期SJ处理)和 $64.29 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ (T3期NB处理),根据中国对外贸易绿色行业标准《药用植物及制剂进出口绿色行业标准》和2015年版《中华人民共和国药典》限量标准规定,滇重楼药材限量标准为 $\text{Cu} \leq 20.0 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{Cd} \leq 0.3 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $\text{Pb} \leq 5.0 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [23],可见,外源接种PGPR对滇重楼新根茎和老根茎内的重金属含量的调控符合行业要求。见表2。

4 讨论

大量施用化肥在提高作物产量的同时也带来了诸多问题,如生态环境恶化、土壤微生物区系单一化、化肥利用率降低等。PRPG在促进植物生长,改善土壤微生物环境,防治植物病害等方面具有重要的作用,在农业生产中一定程度上替代了化肥、农药等应用[24],减少化肥中的有害成分对人类健康及环境造成危害,实现农业的可持续发展。而PGPR可与有机肥结合形成新型、安全、高效的生物有机肥料,其兼具了有机肥和微生物的优点,有机物经过充分的分解有效地提高了肥料利用率,还可为微生物提供充足的养分,维持功能菌种的生物活性,促进植物生长发育[25-26]。烟草喷施SJ增产效果显著,其原因主要是SJ能够增强植株的代谢功能,促进烟叶增厚、增大、浓绿,进而提高叶片的光合作用[25]。本研究结果表明,外源接种不同PGPR对叶片中光合色素含量的调控效果不同,其中,整个生育过程中,FH和SJ对滇重楼叶片中的光合色素含量起到了显著的促进效果,这与韩文超[27]在烟草上的研究结果相同。

矿质营养不仅对机体代谢有着十分重要的作用,而且药材中的矿质营养还具有一定的药理活性,李秀珍等[28]通过等离子体发射光谱法对滇重楼根茎内的微量元素进行检测分析,发现Zn和Ca可能与重楼的止血、消炎、生肌作用有关;Mg能提高机体免疫力,促进抗毒素的合成。人工栽培中药材过程中,化肥或农药的不合理施用会导致中药材内的重金属含量超标,使用重金属药材会直接影响患者临床用药的安全和疗效,土壤中的重金属经药用植物吸收后通过食物链进入体内,进而危害人体健康[29]。近年来根际促生菌调控植物元素吸收和转运,促进植物体内营养元素含量升高,降低其可食部分重金属累积的研究结果相继被报道[30-31]。李霞等[30]于翅荚木苗期接种丛枝菌根真菌(AMF),发现

表 1 不同植物根际促生菌对滇重楼营养元素含量的影响 ($\bar{x}\pm s, n=10$)

Table 1 Effects of different plant growth-promoting rhizobacteria on nutrient element contents in *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* ($\bar{x}\pm s, n=10$)

处理方式	时间	氮/mg·g ⁻¹		磷/mg·g ⁻¹		钾/mg·g ⁻¹		钙/mg·g ⁻¹	
		新根茎	老根茎	新根茎	老根茎	新根茎	老根茎	新根茎	老根茎
CK	T1	1.09±0.03 ^d	1.17±0.03 ^d	0.38±0.06 ^e	1.13±0.01 ^d	3.30±0.07 ^d	5.73±0.23 ^c	12.29±1.46 ^d	23.07±1.95 ^d
	T2	0.77±0.02 ^d	0.46±0.01 ^e	0.26±0.07 ^d	0.15±0.02 ^d	3.01±0.12 ^c	3.11±0.12 ^d	28.41±3.45 ^c	33.25±1.06 ^e
	T3	0.70±0.03 ^d	0.77±0.01 ^d	0.43±0.03 ^d	0.31±0.06 ^c	4.67±0.11 ^c	3.90±0.16 ^c	31.34±3.45 ^e	28.30±3.48 ^d
FH	T1	1.53±0.01 ^b	1.43±0.04 ^b	0.73±0.02 ^b	1.61±0.04 ^c	3.87±0.04 ^c	5.99±0.22 ^c	22.22±2.50 ^a	24.78±1.75 ^b
	T2	0.83±0.01 ^c	0.59±0.02 ^d	0.43±0.06 ^b	0.34±0.01 ^a	3.47±0.13 ^b	3.78±0.17 ^c	28.68±1.49 ^b	34.04±3.45 ^c
	T3	0.80±0.04 ^c	0.84±0.01 ^c	0.45±0.04 ^d	0.35±0.04 ^b	4.77±0.11 ^c	4.30±0.13 ^b	38.25±2.46 ^c	37.22±1.48 ^b
BW	T1	2.83±0.03 ^a	1.28±0.02 ^c	0.85±0.02 ^a	1.86±0.01 ^b	3.77±0.15 ^c	8.28±0.15 ^a	17.70±1.95 ^c	33.37±2.46 ^a
	T2	1.66±0.04 ^a	0.80±0.04 ^c	0.32±0.08 ^c	0.25±0.02 ^b	2.91±0.05 ^c	4.69±0.13 ^a	35.16±1.04 ^a	34.05±1.46 ^d
	T3	0.81±0.01 ^c	1.29±0.02 ^b	0.78±0.07 ^a	0.33±0.02 ^c	6.12±0.22 ^a	4.57±0.33 ^a	46.30±3.48 ^d	32.33±1.05 ^b
GN	T1	1.33±0.07 ^c	1.92±0.01 ^a	0.44±0.04 ^d	1.40±0.05 ^c	3.41±0.12 ^d	6.56±0.15 ^b	30.96±1.86 ^c	42.81±1.49 ^c
	T2	1.26±0.01 ^b	0.56±0.02 ^d	0.39±0.02 ^b	0.32±0.03 ^a	4.26±0.32 ^a	3.28±0.16 ^d	29.83±2.48 ^b	37.02±3.45 ^d
	T3	0.93±0.01 ^b	1.57±0.01 ^a	0.54±0.07 ^b	0.36±0.01 ^b	4.85±0.13 ^c	4.57±0.25 ^a	34.84±1.75 ^b	30.76±2.50 ^b
SJ	T1	1.11±0.04 ^d	1.81±0.05 ^a	0.39±0.05 ^e	1.71±0.04 ^b	5.55±0.21 ^a	6.04±0.34 ^c	30.17±1.66 ^b	30.32±1.04 ^c
	T2	0.86±0.01 ^c	1.19±0.06 ^b	0.54±0.04 ^a	0.20±0.03 ^c	3.11±0.16 ^c	3.65±0.12 ^c	28.96±1.05 ^a	48.43±2.47 ^a
	T3	0.70±0.01 ^d	1.19±0.08 ^b	0.45±0.10 ^d	0.39±0.02 ^a	4.68±0.25 ^c	4.54±0.14 ^a	33.38±1.54 ^a	36.45±1.30 ^a
NB	T1	2.78±0.09 ^a	1.88±0.11 ^a	0.63±0.03 ^c	2.52±0.03 ^a	4.91±0.15 ^b	5.80±0.33 ^c	19.46±1.48 ^b	33.03±1.54 ^d
	T2	1.59±0.01 ^a	1.40±0.12 ^a	0.53±0.04 ^a	0.25±0.02 ^b	3.63±0.22 ^b	4.15±0.11 ^b	29.81±1.30 ^b	38.18±1.48 ^b
	T3	1.92±0.03 ^a	1.26±0.09 ^b	0.49±0.03 ^c	0.36±0.01 ^b	5.01±0.13 ^b	4.22±0.18 ^b	57.65±4.47 ^b	29.57±1.86 ^c

处理方式	时间	镁/mg·g ⁻¹		锌/μg·g ⁻¹		锰/μg·kg ⁻¹	
		新根茎	老根茎	新根茎	老根茎	新根茎	老根茎
CK	T1	2.24±0.12 ^e	8.48±1.22 ^e	517.62±16.05 ^d	392.07±17.46 ^d	389.59±23.41 ^a	525.43±12.87 ^a
	T2	1.81±0.23 ^b	2.10±0.23 ^c	341.15±30.28 ^d	250.00±18.08 ^d	259.34±12.39 ^a	368.87±22.51 ^a
	T3	3.21±0.16 ^e	2.51±0.45 ^c	153.18±10.39 ^e	174.71±10.04 ^e	156.76±10.17 ^a	367.08±23.23 ^a
FH	T1	4.20±0.17 ^b	14.15±1.33 ^d	577.17±17.48 ^c	826.00±32.11 ^a	310.57±11.75 ^c	450.70±17.77 ^b
	T2	1.95±0.22 ^b	3.23±0.73 ^c	451.99±27.05 ^b	287.08±9.60 ^c	73.51±8.10 ^e	213.42±14.15 ^b
	T3	8.43±0.13 ^c	3.12±0.30 ^a	171.19±7.59 ^d	254.69±12.49 ^b	46.23±3.21 ^d	155.44±10.23 ^d
BW	T1	2.59±0.15 ^d	20.68±2.26 ^b	641.08±26.23 ^b	559.03±10.23 ^b	206.81±10.30 ^d	517.86±34.16 ^a
	T2	2.50±0.13 ^a	2.86±0.26 ^c	400.50±11.63 ^c	756.00±21.30 ^a	155.31±12.59 ^b	308.62±20.12 ^b
	T3	4.16±0.16 ^b	3.01±0.45 ^b	425.91±17.01 ^a	311.22±17.21 ^a	134.55±14.04 ^b	296.82±11.90 ^b
GN	T1	2.74±0.25 ^a	11.90±1.21 ^a	677.54±23.20 ^b	882.93±31.39 ^a	176.03±7.74 ^d	377.15±11.22 ^c
	T2	2.10±0.15 ^b	2.87±0.83 ^b	499.01±15.32 ^b	267.03±23.26 ^d	108.52±10.96 ^c	233.60±9.23 ^c
	T3	12.39±0.33 ^d	3.23±0.23 ^c	198.38±12.16 ^c	193.54±12.80 ^d	83.88±13.37 ^c	312.19±28.96 ^b
SJ	T1	3.41±0.14 ^a	10.43±1.42 ^c	611.47±21.58 ^c	465.87±15.92 ^c	211.47±10.95 ^d	265.76±18.48 ^d
	T2	2.70±0.12 ^b	10.22±1.67 ^a	350.45±19.66 ^d	290.63±24.20 ^c	85.30±10.68 ^d	189.76±13.01 ^d
	T3	17.77±0.34 ^e	3.57±0.54 ^a	368.79±12.97 ^b	176.96±11.99 ^e	76.16±8.43 ^c	197.54±4.20 ^c
NB	T1	3.51±0.18 ^c	8.54±1.33 ^b	921.18±27.87 ^a	406.29±39.75 ^d	346.99±12.24 ^b	457.64±12.86 ^b
	T2	2.00±0.11 ^b	4.57±0.42 ^b	817.44±22.00 ^a	583.15±12.62 ^b	145.77±6.70 ^b	234.11±12.10 ^c
	T3	11.28±0.33 ^a	2.98±0.11 ^c	225.00±14.83 ^c	217.65±10.92 ^c	146.00±11.81 ^a	272.48±10.33 ^b

注:每列不同的小写字母表示 $P<0.05$ (表 2 同)。

表2 不同植物根际促生菌对滇重楼重金属元素含量的影响 ($\bar{x} \pm s, n=10$)

Table 2 Effects of different plant growth-promoting rhizobacteria on heavy metal elements contents in *P. polyphylla* var. *yunnanensis* ($\bar{x} \pm s, n=10$) $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

处理方式	时间	砷		铜		铅		镉	
		新根茎	老根茎	新根茎	老根茎	新根茎	老根茎	新根茎	老根茎
CK	T1	1.12±0.03 ^a	1.19±0.04 ^a	265.99±11.04 ^a	303.49±13.45 ^a	464.30±15.92 ^a	412.43±10.92 ^a	25.92±0.13 ^a	18.70±0.34 ^a
	T2	0.98±0.01 ^a	1.23±0.15 ^a	492.64±21.34 ^a	84.65±23.25 ^a	380.42±11.99 ^a	289.86±22.00 ^a	40.42±3.38 ^a	37.75±3.03 ^a
	T3	0.83±0.02 ^a	1.34±0.12 ^a	308.32±11.46 ^a	370.36±13.45 ^a	421.94±17.46 ^a	381.66±32.11 ^a	56.82±2.81 ^a	73.28±1.28 ^a
FH	T1	0.81±0.12 ^b	0.96±0.01 ^b	69.98±6.49 ^f	247.92±28.68 ^c	336.56±19.66 ^b	320.20±12.97 ^c	15.85±0.22 ^d	17.67±0.83 ^a
	T2	0.72±0.01 ^c	0.87±0.08 ^d	395.51±14.78 ^c	75.55±8.45 ^b	282.08±21.30 ^b	242.87±15.32 ^c	23.73±1.48 ^d	27.14±3.23 ^c
	T3	0.78±0.03 ^a	1.20±0.09 ^b	219.76±23.07 ^c	287.80±9.66 ^b	389.37±31.39 ^a	246.36±13.26 ^c	48.61±5.05 ^b	55.76±7.02 ^c
BW	T1	0.84±0.01 ^b	0.96±0.01 ^b	201.50±23.06 ^c	172.91±12.50 ^d	284.17±11.63 ^c	322.98±27.05 ^c	19.24±0.73 ^c	14.83±0.45 ^b
	T2	0.85±0.01 ^b	0.85±0.01 ^d	364.53±28.41 ^c	34.97±5.48 ^d	373.38±10.54 ^a	227.75±9.60 ^c	31.56±6.45 ^c	27.45±2.00 ^c
	T3	0.38±0.11 ^c	1.09±0.03 ^b	227.45±35.16 ^c	235.19±12.50 ^c	364.30±18.08 ^b	155.24±17.01 ^d	35.97±0.45 ^c	57.84±4.84 ^c
GN	T1	0.72±0.09 ^c	0.93±0.01 ^b	128.40±6.30 ^e	282.14±10.95 ^b	337.98±21.58 ^b	371.90±17.21 ^b	21.45±1.30 ^b	18.26±1.21 ^a
	T2	0.70±0.01 ^c	1.08±0.10 ^b	449.67±17.70 ^b	23.03±7.05 ^d	315.72±27.87 ^b	198.15±19.75 ^d	30.92±3.12 ^c	24.66±3.51 ^d
	T3	0.70±0.05 ^b	0.95±0.03 ^c	227.27±18.25 ^c	243.89±12.48 ^c	217.42±16.05 ^d	155.34±10.39 ^d	30.50±1.42 ^d	60.69±1.48 ^b
SJ	T1	0.77±0.04 ^c	0.66±0.06 ^c	231.63±13.48 ^b	187.53±11.75 ^d	434.93±12.62 ^a	265.73±24.20 ^d	17.61±2.46 ^d	12.65±2.98 ^c
	T2	0.81±0.02 ^b	1.07±0.02 ^b	248.46±19.95 ^d	64.36±8.18 ^c	261.76±30.28 ^c	129.88±26.23 ^e	33.37±2.54 ^b	34.51±2.26 ^b
	T3	0.67±0.04 ^b	1.14±0.07 ^b	176.33±2.46 ^d	280.83±10.86 ^b	289.90±14.83 ^c	376.14±12.80 ^a	49.29±2.47 ^b	58.11±0.42 ^c
NB	T1	0.82±0.01 ^b	0.96±0.02 ^b	174.80±12.29 ^d	170.05±8.30 ^d	261.65±12.49 ^a	255.35±23.20 ^d	18.47±1.49 ^c	9.99±1.23 ^d
	T2	0.70±0.03 ^c	1.01±0.08 ^c	380.75±10.46 ^c	79.70±3.48 ^a	196.07±7.59 ^d	266.57±17.48 ^b	31.75±1.33 ^c	26.03±3.57 ^d
	T3	0.70±0.04 ^b	1.11±0.04 ^b	268.00±22.22 ^b	354.06±19.46 ^a	290.50±12.16 ^c	319.59±10.23 ^b	22.00±1.67 ^e	64.29±4.57 ^b

外源接种AMF能够降低翅莢木体内锌浓度,同时增加锌的累积量;张海珠等^[31]于滇重楼苗期接种不同AMF,发现接种不同AMF可增加果熟期重楼药材中镁和锌含量,并能降低重金属铜含量。本研究结果表明,外源接种PGPR不仅对滇重楼根茎内的营养元素含量起到了积极的促进作用,还显著降低了新根茎和老根茎内的重金属元素砷,铜,铅和镉含量,并且新根茎和老根茎内的重金属元素含量均符合行业标准,可见,外源接种PGPR有利于提高滇重楼根茎的药用价值,这与AMF在滇重楼药用品质方面的研究结果相同^[30-31]。

综上所述,外源接种PGPR可以不同程度地增加根系活力及叶片内光合色素含量,增强叶片内的抗氧化酶活性,减少叶片中MDA的产生,不同程度地提升新根茎和老根茎内营养元素含量,降低重金属元素含量,提高了滇重楼根茎的药用价值。从综合接种效应来看,FH和SJ对滇重楼幼苗生长的促进及根茎药用价值的调控效果最佳。本研究对PGPR的促生作用进行了初步探讨,关于其促生机制还有待进一步深入研究,该研究结果可为PGPR在中药种植尤其是滇重楼生产实践中的应用提供

理论指导。

〔利益冲突〕 本文不存在任何利益冲突。

〔参考文献〕

- [1] 赵顺鑫,魏祖晨,黎海灵,等. 须根自然腐解对滇重楼生长及其活性成分含量的影响[J]. 中国实验方剂学杂志, 2021, 27(20): 138-145.
- [2] 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.
- [3] MALUSA E, VASSILEV N. A contribution to set a legal framework for biofertilisers[J]. Appl Microbiol Biot, 2014, 98(15): 6599-6607.
- [4] GLICK, BERNARD R. The enhancement of plant growth by free-living bacteria[J]. Can J Microbiol, 1995, 41(2): 109-117.
- [5] 荣良燕,姚拓,黄高宝,等. 植物根际优良促生菌(PGPR)筛选及其接种剂部分替代化肥对玉米生长影响研究[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(2): 59-65.
- [6] ADESEMOYE A O, TORBERT H A, KLOEPFER J W. Enhanced plant nutrient use efficiency with PGPR

- and AMF in an integrated nutrient management system [J]. Can J Microbiol, 2008, 54(10): 876-886.
- [7] SOPHIE M, BRUNO T. Plant growth-promoting bacteria and nitrate availability: impacts on root development and nitrate uptake [J]. J Exp Bot, 2004, 394: 27-34.
- [8] 马文彬, 姚拓, 王国基, 等. 根际促生菌筛选及其接种剂对箭筈豌豆生长影响的研究 [J]. 草业学报, 2014, 23(5): 241-248.
- [9] 吴东升. 根际促生菌对设施西瓜生长、品质及产量的影响 [J]. 北方园艺, 2019, 6(24): 62-67.
- [10] 丁新景, 黄雅丽, 马风云, 等. 根际促生菌对景天科多肉植物雪莲的促生作用 [J]. 东北林业大学学报, 2016, 44(12): 26-30.
- [11] 朱红艳, 李建设, 高艳明, 等. 根际促生菌对设施西瓜生长品质及产量的影响 [J]. 农业与技术, 2019, 39(22): 12-15, 42.
- [12] 张杨, 王甜甜, 孙玉涵, 等. 西瓜根际促生菌筛选及生物育苗基质研制 [J]. 土壤学报, 2017, 54(3): 703-712.
- [13] 孙晓伟, 姚健, 李建华, 等. 微生物菌剂对许昌烟区烤烟黑胥病防治和烟叶品质的影响 [J]. 安徽农业科学, 2019, 47(20): 151-154.
- [14] 毕扬, 张艳杰, 郭巍, 等. 防治西葫芦和黄瓜白粉病的生物制剂的筛选 [J]. 植物保护, 2016, 42(5): 234-237, 241.
- [15] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [16] LICHTENTHALER H K. Chlorophylls and carotenoids-pigments of photosynthetic biomembranes [J]. Method Enzymol, 1987, 148: 350-382.
- [17] DHINDSA R S, PLUMB-DHINDSA P, THORPE T. Leaf senescence: correlated with increased levels of membrane permeability and lipid peroxidation, and decreased levels of superoxide dismutase and catalase [J]. J Exp Bot, 1981, 32: 93-101.
- [18] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding [J]. Anal Biochem, 1976, 72: 248-254.
- [19] FU J, HUANG B. Involvement of antioxidants and lipid peroxidation in the adaptation of two cool-season grasses to localized drought stress [J]. Environ Exp Bot, 2001, 45(2): 105-124.
- [20] GIANNOPOLITIS C N, RIES S K. Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants [J]. Plant Physiol, 1977, 59: 309-314.
- [21] CHOUDHARY K. Plant growth-promotion (PGP) activities and molecular characterization of rhizobacterial strains isolated from soybean (*Glycine max* L. Merril) plants against charcoal rot pathogen *Macrophomina phaseolina* [J]. Biotechnol Lett, 2011, 33: 2287-2295.
- [22] 刘彦明. 原子吸收光谱法测定中成药中微量元素 [J]. 光谱学与光谱分析, 2000, 20(3): 373-375.
- [23] 齐耀东, 张志鹏, 张昭, 等. 关黄柏产区土壤重金属污染及药材安全性评价 [J]. 中国中药杂志, 2016, 41(3): 383-389.
- [24] ZHAO Q Y, SHEN Q R, RAN W, et al. Inoculation of soil by *Bacillus subtilis* Y-IV improves plant growth and colonization of the rhizosphere and interior tissues of muskmelon (*Cucumis melo* L.) [J]. Biol Fert soils, 2011, 47(5): 507-514.
- [25] LING N, ZHANG W, TAN S, et al. Effect of the nursery application of bioorganic fertilizer on spatial distribution of *Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum* and its antagonistic bacterium in the rhizosphere of watermelon [J]. Appl Soil Ecol, 2012, 59: 13-19.
- [26] 梅新兰, 赵青云, 谭石勇, 等. 辣椒疫病拮抗菌株筛选、鉴定及其防效 [J]. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2652-2658.
- [27] 韩文超. “三炬康生”微生物菌剂在烟草上的肥效试验初报 [J]. 农民致富之友, 2013, 13(16): 109.
- [28] 李秀珍, 于昌贵, 柏岩. 清热解毒药北重楼中微量元素的分析 [J]. 黑龙江医药, 1995, 8(2): 328-329.
- [29] 杨敏, 张杰, 沈昱翔, 等. 滇重楼与丛枝菌根的共生对重金属元素吸收的影响 [J]. 环境化学, 2018, 37(4): 860-870.
- [30] 李霞, 彭霞薇, 伍松林, 等. 丛枝菌根对翅荚木生长及吸收累积重金属的影响 [J]. 环境科学, 2014, 35(8): 3142-3148.
- [31] 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.

[责任编辑 顾雪竹]