

## · 根际促生菌对滇重楼的影响专题 ·

[编者按] 该专题就根际促生菌对滇重楼叶片生理指标的影响,以及对滇重楼药材品质及根际土壤肥力的影响,涵盖了滇重楼叶片生长发育、光合色素含量、根际土壤理化性质、微生物群落结构及土壤酶活性的影响以及相关因素之间的相关性分析,接种钾细菌和解磷菌能有效促进滇重楼的生长发育,提高滇重楼在逆境中的生存能力,以期为滇重楼的绿色可持续发展奠定理论基础。植物根际促生菌(PGPR)是指在植物根际生境中生存,起到固氮、溶磷、解钾、产生促进植物生长物质的直接作用和产生微生物间拮抗、竞争、诱导抗性的间接作用的有益微生物。该专题就滇重楼(*Paris polyphylla* var. *yunnanensis*)根际促生菌(解钾细菌和解磷细菌)对叶片生理指标的影响,以及对滇重楼药材品质及根际土壤肥力的影响。研究表明,接种解钾细菌和解磷细菌后,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,滇重楼根茎总皂苷含量增加;土壤微生物数量、连接酶活性,酸性磷酸酶、中性磷酸酶、碱性磷酸酶、蛋白酶、蔗糖酶和过氧化氢酶的活性均有提高;根际土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量均有提高,根际土壤pH降低,提高了土壤速效养分含量,根接种解钾细菌和解磷细菌能有效促进滇重楼的生长发育,提高滇重楼在逆境中的生存能力,以期为滇重楼的绿色可持续发展奠定理论基础。

# 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

王丹, 赵顺鑫, 吴洋桢, 吴应梅\*, 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:研究接种解钾细菌对滇重楼生理特性的影响。方法:通过室温盆栽实验,研究接种不同解钾细菌对滇重楼叶片面积、光合色素含量及叶片生理指标的影响。结果:接种解钾细菌后,滇重楼叶面积有一定程度的增加,平均叶面积最大的是S3组,达到了10.497 cm<sup>2</sup>,较对照组最大增幅为11.0%;接种解钾细菌能提高叶片中光合色素的含量,其中,叶绿素a的含量明显增加( $P < 0.05$ ),较CK组最大增幅为80.6%,且所有处理组的叶绿素a/b值均高于CK组;接种解钾细菌后滇重楼叶片中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)活性增强,与CK组比较最大增幅分别为88.4%、33.8%和30.6%;接种解钾细菌能促进滇重楼叶片细胞对渗透调节物质可溶性糖和可溶性蛋白的积累,较CK组最大增幅分别为55.3%、70.5%,同时还降低丙二醛(MDA)的含量,较CK组最大降幅为34.1%;相关性分析结果显示,滇重楼叶片中不同化学成分指标之间部分存在相关性。结论:解钾细菌能有效促进滇重楼的生长发育,提高滇重楼在逆境中的生存能力,对于提高滇重楼人工种植存活率具有一定的科学意义和潜在的应用价值。

[关键词] 滇重楼; 解钾细菌; 生理生化; 活性成分

[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)16-0150-06

[doi] 10.13422/j.cnki.syfjx.20221016

[网络出版地址] <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3495.R.20220624.1401.003.html>

[网络出版日期] 2022-06-25 16:39

## Effect of Potassium Solubilizing Bacteria on Leaf Area, Photosynthetic Pigment Content, Physiology and Biochemistry of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*

WANG Dan, ZHAO Shunxin, WU Yangzhen, WU Yingmei\*, ZHOU Nong\*

(The Chongqing Engineering Laboratory for Green Cultivation and Deep Processing of the Three Gorges)

[收稿日期] 2022-04-21

[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] 王丹,在读硕士,从事药食同源植物资源开发利用研究工作, E-mail: wd21171103@163.com

[通信作者] \* 吴应梅,实验师,从事食品、药品质量评价及药用植物栽培研究, Tel: 023-58102522, E-mail: 20050030@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

*Reservoir Area's Medicinal Herbs, College of Food and Biological Engineering,  
Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404120, China)*

**[Abstract]** **Objective:** To investigate the effects of inoculation of potassium-solubilizing bacteria on the physiological characteristics of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*. **Method:** The effects of different potassium-solubilizing bacteria on leaf area, photosynthetic pigment content, and active component indexes of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* were investigated by pot planting at room temperature. **Result:** The results showed that the inoculation of potassium-solubilizing bacteria could increase the leaf area of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*. The largest average leaf area was observed in the S3 group, reaching 10.497 cm<sup>2</sup>, with a maximum increase of 11.0% compared with that of the CK group. The inoculation of potassium-solubilizing bacteria could increase the content of photosynthetic pigments in leaves. Among them, the increase in chlorophyll a content was significant ( $P < 0.05$ ), which was 80.6% higher than that of the CK group. The chlorophyll a/b values in all treatment groups were higher than that of the CK group. The activities of superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and peroxidase (POD) in the leaves of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* increased by 88.4%, 33.8%, and 30.6%, respectively, as compared with that in the CK group. The inoculation of potassium-solubilizing bacteria could promote the accumulation of osmoregulation substances such as soluble sugar and soluble protein in leaf cells of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*, with a maximum increase of 55.3% and 70.5% respectively compared with that of the CK group. Meanwhile, it also reduced the content of malondialdehyde (MDA), with a maximum decrease of 34.1% compared with that of the CK group. The results of correlation analysis showed that there were some correlations between different chemical components in *P. polyphylla* var. *yunnanensis* leaves. **Conclusion:** The inoculation of potassium-solubilizing bacteria can effectively promote the growth and development of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* and improve its survival ability in adversity. It is of practical scientific significance and potential application value for improving the survival rate of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* by artificial planting.

**[Keywords]** *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*; potassium-solubilizing bacteria; physiology and biochemistry; active components

滇重楼 *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* 是百合科重楼属多年生草本植物,以根茎入药,其性微寒,味苦,作为云南的道地药材,在抗肿瘤、免疫调节等方面具有显著的药用价值<sup>[1]</sup>。但滇重楼繁殖率较低,其药用部位根状茎的自然生长十分缓慢,从种子发芽到生长成药用商品,一般需8~10年及以上的时间,提高滇重楼生长速率是人工种植中重点关注的问题。解钾细菌是一类具有分解钾长石、磷灰石等不溶性硅铝酸盐无机矿物能力的植物根际促生细菌(PGPR)菌株,可以改善根际土壤微生态环境,并将土壤中难溶性钾素溶解为有效态钾,提高土壤中速效钾的含量,从而促进植物生长发育,提高作物产量<sup>[2]</sup>。董昌金等<sup>[3]</sup>从土壤样品中筛选出几株高效解钾菌株,组合能使番茄和油菜的生物量分别提高65.9%和68.4%。杨东艳等<sup>[4]</sup>施加解钾菌处理不仅显著增加了土壤速效钾含量,而且对于土壤磷元素的释放效果优于溶磷菌。

植物的生长通常体现在其体积、长度或面积的增加,与多种生理过程有关,包括光合作用、物质运输和酶活性等<sup>[5]</sup>。植物的光合作用是将水和二氧化碳经一系列反应后转化为有机能量物质并释放出氧气的过程<sup>[6]</sup>,为植物的生长发育提供保障,光合色素作为植物光合作用的物质载体,其含量高低能有效反映出植物光合作用的强度和光合产物的形成<sup>[7-8]</sup>。植物生理活性物质包含酶、多糖和蛋白质等,能有效调节植物的机体平衡和生长发育<sup>[9]</sup>,超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)等是植物保护酶系统的重要组成,能够催化植物体内活性氧超氧阴离子分解为无害的水和氧气,从而避免植物遭受损伤<sup>[10]</sup>,可溶性蛋白与可溶性糖作为植物体内渗透压调节物质,影响植物体内的物质运输<sup>[11]</sup>,丙二醛(MDA)是一种膜脂过氧化反应的最终产物,其含量高低能有效反映出植物的受损程度<sup>[12]</sup>。本研究通过解钾菌对滇重楼的叶面

积、光合色素与生理活性物质含量、抗氧化酶活性及生长发育等指标的影响,为解钾菌在滇重楼人工栽培中的应用提供参考。

## 1 材料

**1.1 仪器** CI-203型手持式激光叶面积仪(美国CID Bio-Science, Inc.公司),UV-2450型紫外-可见分光光度计(日本岛津集团),ME204E型1/1万电子天平(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)。

**1.2 试剂** 无水乙醇、核黄素、乙二胺四乙酸钠、磷酸、三氯乙酸、氮蓝四唑(成都市科隆化学品有限公司,批号分别为2021062102、2020041701、2019062903、2020051402、2018091101、2018111101),愈创木酚(中国金致化工有限公司,批号20181210),牛血清蛋白(上海如吉生物科技发展有限公司,批号190115),实验用水为去离子超纯水。

## 2 方法

**2.1 实验设计** 于2021年1月在贵州省安顺市安

顺学院的温室大棚进行盆栽试验。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后待用。供试菌株为课题组分离培养并活化的滇重楼根际土壤解钾细菌的3种优势种(苏云金芽孢杆菌 *Bacillus thuringiensis*, 解淀粉芽孢杆菌 *Paenibacillus amylolyticus* 和多粘芽孢杆菌 *B. polymyxa*<sup>[13]</sup>),将预先繁殖的稳定解钾菌菌株用无菌生理盐水调节菌悬液密度至  $1 \times 10^6$  CFU·mL<sup>-1</sup>,制成接种剂。滇重楼实生苗来自云南省大理州永平县杉阳镇普棚村规范化种植基地,为4年生健壮植株,并经保山中医药高等专科学校杨发建副教授鉴定。种源采用单株保存,保证种质资源的稳定性和均一性。栽培期间按照滇重楼植株室内栽培进行常规管理。

实验共设7个处理(S1~S7)组和空白组(栽培基质灭菌不接种,CK)。每组栽种10盆,每盆栽种5株滇重楼实生苗,以等量无菌生理盐水为对照,菌剂浇灌于滇重楼根部。各处理组菌剂接种信息见表1。

表1 不同处理组接种菌株情况

Table 1 Inoculated strains in different treatment groups

组别	接种菌种	接种剂量
S1组	苏云金芽孢杆菌( <i>B.thuringiensis</i> )	30mL/株
S2组	解淀粉芽孢杆菌( <i>P.amylolyticus</i> )	30mL/株
S3组	多粘芽孢杆菌( <i>B.polymyxa</i> )	30mL/株
S4组	苏云金芽孢杆菌( <i>B.thuringiensis</i> )、解淀粉芽孢杆菌( <i>P.amylolyticus</i> )	2种菌各15mL/株
S5组	苏云金芽孢杆菌( <i>B.thuringiensis</i> )、多粘芽孢杆菌( <i>B.polymyxa</i> )	2种菌各15mL/株
S6组	解淀粉芽孢杆菌( <i>P.amylolyticus</i> )、多粘芽孢杆菌( <i>B.polymyxa</i> )	2种菌各15mL/株
S7组	苏云金芽孢杆菌( <i>B.thuringiensis</i> )、解淀粉芽孢杆菌( <i>P.amylolyticus</i> )、多粘芽孢杆菌( <i>B.polymyxa</i> )	3种菌各10 mL/株

于2021年9月随机采集滇重楼健康的新鲜叶片,用于相关指标的测定。

**2.2 指标测定** 叶面积采用激光叶面积测定仪进行测定;采用舒展等的方法测定光合色素含量。叶绿素提取液为丙酮、水和无水乙醇,按照4:1:5比例混合溶液,避光条件下浸提3~4 d后,利用紫外分光光度计测定470、646、663 nm波长下的吸光度A,根据公式计算得出叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素含量<sup>[14]</sup>。采用张志良等<sup>[15]</sup>的方法对滇重楼叶片化学成分指标进行测定,SOD、CAT和POD的活性分别采用氮蓝四唑法、紫外分光光度法以及愈创木酚显色法测定;MDA和可溶性糖的含量测定采用硫代巴比妥酸法,可溶性蛋白的含量测定采用考马斯亮蓝比色法。

**2.3 数据分析** 采用Excel 2010进行数据处理,运用SPSS 22.0软件进行数据分析,运用Origin 2017软件进行图像绘制。

## 3 结果与分析

**3.1 解钾菌对滇重楼叶面积的影响** 施加不同解钾菌后,对处理组滇重楼叶面积产生不同程度的影响,部分差异存在统计学意义( $P < 0.05$ )。与CK组比较,S1、S2、S3和S6组的平均叶面积呈增大的趋势,S4、S5和S7组平均叶面积则有一定程度的减小;平均叶面积最大的是S3组,达到了10.497 cm<sup>2</sup>,较CK组最大增幅为11.0%。总体来看,施加不同解钾菌后,半数以上的处理组滇重楼平均叶面积呈现出增大的趋势。见表2。

**3.2 解钾菌对滇重楼叶片光合色素的影响** 施加

表2 不同处理组滇重楼平均叶面积 ( $\bar{x} \pm s, n=3$ )

Table 2 Average leaf area of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* in different treatment groups ( $\bar{x} \pm s, n=3$ )

组别	叶面积/cm <sup>2</sup>
S1组	10.029±0.294 <sup>b</sup>
S2组	10.006±0.154 <sup>b</sup>
S3组	10.497±0.188 <sup>a</sup>
S4组	9.222±0.145 <sup>d</sup>
S5组	9.316±0.095 <sup>cd</sup>
S6组	10.049±0.182 <sup>b</sup>
S7组	9.284±0.139 <sup>cd</sup>
CK组	9.456±0.185 <sup>c</sup>

注:不同小写字母表示同一列数据差异存在统计学意义( $P<0.05$ )(表3-表5同)

表3 不同处理组滇重楼叶片光合色素含量

Table 3 Photosynthetic pigment content of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* leaves in different treatment groups

组别	叶绿素 a/mg·g <sup>-1</sup> ( $\bar{x} \pm s, n=3$ )	叶绿素 b/mg·g <sup>-1</sup> ( $\bar{x} \pm s, n=3$ )	类胡萝卜素/mg·g <sup>-1</sup> ( $\bar{x} \pm s, n=3$ )	叶绿素 a/b
S1组	0.963±0.024 <sup>ab</sup>	0.425±0.046 <sup>b</sup>	0.468±0.004 <sup>a</sup>	2.266
S2组	0.797±0.298 <sup>bc</sup>	0.573±0.384 <sup>ab</sup>	0.428±0.097 <sup>abc</sup>	1.391
S3组	0.757±0.264 <sup>bc</sup>	0.369±0.223 <sup>ab</sup>	0.443±0.143 <sup>ab</sup>	2.051
S4组	0.656±0.395 <sup>bc</sup>	0.294±0.161 <sup>b</sup>	0.293±0.143 <sup>c</sup>	2.231
S5组	1.129±0.261 <sup>a</sup>	0.517±0.118 <sup>ab</sup>	0.525±0.106 <sup>a</sup>	2.184
S6组	0.698±0.092 <sup>bc</sup>	0.339±0.121 <sup>b</sup>	0.377±0.052 <sup>abc</sup>	2.059
S7组	0.845±0.340 <sup>abc</sup>	0.490±0.246 <sup>ab</sup>	0.436±0.161 <sup>abc</sup>	1.724
CK组	0.625±0.314 <sup>abc</sup>	0.519±0.204 <sup>a</sup>	0.403±0.168 <sup>abc</sup>	1.204

**3.3 解钾菌对滇重楼叶片保护酶活性的影响** 施加不同解钾菌会对滇重楼叶片保护酶活性产生一定的影响,部分差异存在统计学意义( $P<0.05$ )。施加不同解钾菌后,所有处理组的滇重楼叶片 SOD 酶活性均高于 CK 组, S2 组叶片 SOD 酶活性最高,比 CK 组提高了 88.4%;施加解钾菌后,处理组的滇重楼叶片 POD 酶活性整体呈现增强的趋势,除 S6 组外,其余处理组的 POD 酶活性均高于 CK 组,其中, S4 组中滇重楼叶片的 POD 酶活性最高,与 CK 组相比提升了 30.6%;所有处理组滇重楼叶片中 CAT 酶活性存在不同的变化趋势, S1、S2、S4 组滇重楼叶片 CAT 酶活性高于 CK 组,其余处理组 CAT 酶活性均低于 CK 组, S1 组叶片 CAT 酶活性增幅最明显,达到了 33.8%。见表 4。

**3.4 解钾菌对滇重楼叶片丙二醛、可溶性糖、可溶性蛋白含量的影响** 不同解钾菌处理对滇重楼叶片中 MDA、可溶性糖、可溶性蛋白含量具有不同程度的影响,部分差异存在统计学意义( $P<0.05$ )。施

解钾菌会对滇重楼叶片中光合色素含量产生影响,部分差异存在统计学意义( $P<0.05$ )。各处理组滇重楼叶片中叶绿素 a 的含量均高于 CK 组,其中, S5 组滇重楼叶片中叶绿素 a 的含量增幅最大,与 CK 组比较,增幅达 80.6%;大部分处理组滇重楼叶片中叶绿素 b 的含量均低于 CK 组,7 个处理组中仅 S2 组的叶绿素 b 含量高于 CK 组,提升了 10.4%;类胡萝卜素的含量除 S4 和 S6 组外,其余处理组均高于 CK 组, S5 组的类胡萝卜素含量最高,与 CK 组比较,增加了 30.3%;所有处理组叶绿素 a/b 的水平均高于 CK 组。结果说明,施加解钾菌会对滇重楼叶片光合色素产生不同程度的影响,大部分处理组的 3 种光合色素总含量与 CK 组相比呈现上升的趋势,整体来看,施加解钾菌会对增加滇重楼叶片光合色素含量。见表 3。

表4 不同处理组滇重楼叶片保护酶活性 ( $\bar{x} \pm s, n=3$ )

Table 4 Protective enzyme activities of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* leaves in different treatment groups ( $\bar{x} \pm s, n=3$ ) U·g<sup>-1</sup>

组别	SOD	POD	CAT
S1组	412.847±0.271 <sup>a</sup>	1 223.194±0.028 <sup>b</sup>	282.907±0.101 <sup>a</sup>
S2组	661.821±0.508 <sup>a</sup>	1 437.400±0.604 <sup>b</sup>	232.402±0.394 <sup>ab</sup>
S3组	562.003±0.269 <sup>a</sup>	1 357.967±0.450 <sup>b</sup>	179.029±0.255 <sup>ab</sup>
S4组	445.026±0.687 <sup>a</sup>	1 613.670±0.849 <sup>a</sup>	258.375±0.435 <sup>ab</sup>
S5组	611.978±0.398 <sup>a</sup>	1 593.980±0.601 <sup>b</sup>	206.499±0.097 <sup>ab</sup>
S6组	437.177±0.555 <sup>a</sup>	920.628±0.224 <sup>b</sup>	199.941±0.288 <sup>ab</sup>
S7组	433.382±0.446 <sup>a</sup>	1 286.461±0.482 <sup>b</sup>	205.400±0.477 <sup>ab</sup>
CK组	351.323±0.735 <sup>a</sup>	1 235.639±0.828 <sup>ab</sup>	211.509±0.483 <sup>ab</sup>

加解钾菌会对滇重楼叶片 MDA 含量产生一定影响,但均无统计学差异;除 S2 和 S5 组外,所有处理组叶片 MDA 含量均低于 CK 组, S4 组 MDA 含量降幅最大,达 34.1%; S2、S3 和 S7 组叶片中可溶性糖含量高于 CK 组, S7 组含量最高,较 CK 组增加了 55.3%;施加解钾菌后,处理组叶片可溶性蛋白含量

呈上升趋势,除S3和S4组外,其余处理组叶片可溶性蛋白含量均高于CK组,S5组叶片可溶性蛋白含量最高,与CK组比较增加了70.5%。见表5。

表5 不同处理组滇重楼叶片MDA、可溶性糖、可溶性蛋白含量 ( $\bar{x}\pm s, n=3$ )

Table 5 Contents of MDA, soluble sugar and soluble protein in leaves of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* in different treatment groups ( $\bar{x}\pm s, n=3$ )

组别	MDA/ $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$	可溶性糖/ $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$	可溶性蛋白/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$
S1组	0.038±0.003 <sup>a</sup>	0.392±0.031 <sup>c</sup>	16.001±0.191 <sup>ab</sup>
S2组	0.044±0.035 <sup>a</sup>	0.710±0.484 <sup>abc</sup>	17.065±0.774 <sup>ab</sup>
S3组	0.037±0.013 <sup>a</sup>	0.932±0.169 <sup>abc</sup>	9.991±0.172 <sup>b</sup>
S4组	0.029±0.011 <sup>a</sup>	0.523±0.162 <sup>bc</sup>	11.564±0.182 <sup>ab</sup>
S5组	0.050±0.015 <sup>a</sup>	0.671±0.221 <sup>abc</sup>	20.735±0.534 <sup>ab</sup>
S6组	0.040±0.016 <sup>a</sup>	0.626±0.266 <sup>abc</sup>	18.612±0.528 <sup>ab</sup>
S7组	0.035±0.011 <sup>a</sup>	1.042±0.839 <sup>abc</sup>	16.452±0.429 <sup>ab</sup>
CK组	0.044±0.010 <sup>a</sup>	0.671±0.512 <sup>a</sup>	12.163±0.501 <sup>ab</sup>

3.5 解钾菌滇重楼叶片化学成分相关性分析 选用皮尔逊系数进行双尾检验,结果显示,滇重楼叶片中不同化学成分指标之间存在相关性。其中,叶绿素a与类胡萝卜素之间呈正相关( $r=0.840$ ,

$P<0.01$ );叶绿素b与MDA之间呈正相关( $r=0.719$ ,  $P<0.05$ );类胡萝卜素与MDA呈正相关( $r=0.708$ ,  $P<0.05$ );可溶性糖与CAT之间呈负相关( $r=-0.773$ ,  $P<0.05$ )。见表6。

#### 4 讨论

植物叶面积增大,吸光面积增大,使植株光合作用增强,促进植株生长发育<sup>[16]</sup>。本研究结果表明,接种解钾菌能显著增大滇重楼叶面积( $P<0.05$ )。光合色素的含量可反映光合作用的强弱,其在光能的吸收、转化和传递过程以及避免光氧化损害中扮演着重要的角色<sup>[17]</sup>。王艳霞等<sup>[18]</sup>发现添加外源根际促生菌能提高田菁的叶绿素含量,有效缓解盐胁迫对田菁生长发育的影响。朱娟娟等<sup>[19]</sup>研究表明,解钾菌能提高盐胁迫下枸杞叶片的叶绿素相对含量17.8%。本研究中,接种解钾菌会影响滇重楼叶片中叶绿素含量,与CK相比,叶绿素a的含量均增加,最大增幅可达80.6%,叶绿素b含量除S2以外均减少;所有处理组的叶绿素a/b值均高于CK组,说明解钾菌能提高滇重楼对更高强度光照的耐受性,提高滇重楼将光能转化为生物化学能的效率,促进滇重楼生长发育。

表6 滇重楼叶片化学成分相关性分析

Table 6 Correlation analysis of chemical components in leaves of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*

指标	叶绿素a	叶绿素b	类胡萝卜素	MDA	可溶性糖	可溶性蛋白	CAT	POD	SOD
叶绿素a	-								
叶绿素b	0.385	-							
类胡萝卜素	0.840 <sup>2)</sup>	0.615	-						
MDA	0.495	0.719 <sup>1)</sup>	0.708 <sup>1)</sup>	-					
可溶性糖	-0.065	0.244	0.194	-0.024	-				
可溶性蛋白	0.663	0.401	0.506	0.588	-0.126	-			
CAT	0.118	-0.102	-0.208	-0.304	-0.773 <sup>1)</sup>	0.011	-		
POD	0.313	0.157	0.061	-0.007	0.003	-0.131	0.194	-	
SOD	0.448	0.349	0.416	0.422	0.222	0.314	-0.231	0.500	-

注: <sup>1)</sup> $P<0.05$ , <sup>2)</sup> $P<0.01$

作为植物保护酶的重要组成,SOD、CAT、POD和在维持植物细胞正常代谢、保持植株正常生理功能方面发挥重要作用,对植物的抗逆性能产生影响<sup>[10]</sup>。本研究发现,接种解钾菌后,滇重楼叶片中3种保护酶的活性呈现增强的趋势,与CK组相比,SOD、CAT和POD活性最大增幅分别为88.4%、33.8%和30.6%,说明接种解钾菌能增强滇重楼叶片清除过氧化自由基的能力,从而提高滇重楼在恶劣环境中生存的能力,这与冯晓英等<sup>[20]</sup>接种解钾菌增

强玉米幼苗的抗旱能力研究结果一致。

光氧化损伤会引起叶片内的电解质渗漏率和膜脂过氧化产物MDA含量增加。可溶性糖和可溶性蛋白通过影响植物体细胞膜的渗透调节,参与了植物细胞的新陈代谢,能有效提高植物的逆境生存能力,当两者含量较高时,植物的代谢活性随之增强<sup>[17]</sup>。本研究表明,接种解钾菌会对滇重楼叶片中可溶性糖与可溶性蛋白含量产生不同程度的影响,部分处理组含量增多,MDA含量总体上呈现减少

的趋势,滇重楼叶片细胞膜稳定性得到了提升,代谢活性有一定程度的增强。

综上所述,接种解钾菌能增加滇重楼叶面积,提高叶片中光合色素的含量,激活了滇重楼叶片中SOD、POD和CAT酶活性,促进滇重楼叶片细胞对可溶性糖、可溶性蛋白等渗透调节物质的积累,降低了MDA的含量,可有效促进滇重楼的生长发育,提高滇重楼在逆境中的生存能力。接种解钾菌对于提高滇重楼人工种植存活率具有较为实际的科学意义和潜在的应用价值。

[利益冲突] 本文不存在任何利益冲突。

#### [参考文献]

- [1] 武珊珊,高文远,段宏泉,等. 重楼化学成分和药理作用研究进展[J]. 中草药,2004,35(3):110-113.
- [2] 谷付旗,季秀玲,魏云林. 土壤硅酸盐细菌的研究进展[J]. 中国微生物学杂志,2013,25(5):609-611,616.
- [3] 董昌金,蒋宝贵. 复合微生物肥料高效菌株的筛选[J]. 安徽农业科学,2005,33(1):56-57.
- [4] 杨冬艳,高晶霞,桑婷,等. 溶磷菌和解钾菌对拱棚连作辣椒生长及土壤养分含量的影响[J]. 北方园艺,2019,43(6):1-6.
- [5] 许悦. 干旱胁迫对四种植物碳水过程的影响及其致死机制探究[D]. 广州:仲恺农业工程学院,2017.
- [6] 王广华,李春荣,邓红章,等. 地质储存CO<sub>2</sub>泄漏对黑麦草生理生化性质的影响[J]. 环境科学与技术,2017,40(12):140-144.
- [7] 尹海龙,田长彦. 不同盐度环境下盐地碱蓬幼苗光合生理生态特征[J]. 干旱区研究,2014,31(5):850-855.
- [8] 黄小晶,许泽华,牛锐敏,等. 叶片黄化对'赤霞珠'葡萄光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. 经济林研究,2020,38(3):190-199.
- [9] 韩慧,张平平,吴兆亮. 植物皂甙、多糖和类黄酮的应用与开发[J]. 天津农学院学报,2005,12(3):58-61.
- [10] 孟琳钦. 大麦黄矮病毒—麦蚜—小麦互作的生理机制初探[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [11] 张梦瑜. 冻融环境下碱性盐胁迫及刈割干扰对黑麦的生理影响[D]. 长春:吉林大学,2020.
- [12] 王连翠. 临沂地区引进不同茶树品种的抗寒性研究[D]. 济南:山东师范大学,2007.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 张志良,瞿伟菁,李小方. 植物生理学实验指导[M]. 4版. 北京:高等教育出版社,2009:58-143.
- [16] 覃凤飞,李志华,刘信宝,等. 外源2,4-表油菜素内酯对越夏期高温与弱光胁迫下紫花苜蓿生长和光合性能的影响[J]. 草业学报,2020,29(9):146-160.
- [17] 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):138-144.
- [18] 王艳霞,解志红,张蕾,等. 田菁根际促生菌的筛选及其促生耐盐效果[J]. 微生物学报,2020,60(5):1023-1035.
- [19] 朱娟娟,马海军,张琇,等. 盐胁迫下解钾菌对枸杞幼苗的促生效应[J]. 应用生态学报,2021,32(4):1289-1297.
- [20] 冯晓英,周桂雄,吴庆珊,等. 5株解钾菌解钾能力和抗旱效应的比较[J]. 河南农业科学,2020,49(6):59-63.

[责任编辑 顾雪竹]