

孙向丽, 王 银, 谈建中, 等. 外源腐胺和 *D*-精氨酸对低温胁迫下红掌生理生化指标的影响[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(1): 152-157.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2018.01.022

## 外源腐胺和 *D*-精氨酸对低温胁迫下红掌生理生化指标的影响

孙向丽<sup>1</sup>, 王 银<sup>2</sup>, 谈建中<sup>1</sup>, 王 波<sup>1</sup>

(1. 苏州大学园艺系, 江苏 苏州 215123; 2. 苏州歌林小镇物业管理有限公司, 江苏 苏州 215104)

**摘要:** 为研究外源腐胺(Put)对红掌冬季生长过程中低温胁迫的缓解作用,以红掌品种阿拉巴马为试验材料,在6℃低温胁迫下,探讨不同浓度(0.5 mmol/L、1.0 mmol/L、1.5 mmol/L、2.0 mmol/L)的Put和1.0 mmol/L *D*-精氨酸(*D*-Arg)对红掌生理生化指标的影响。结果表明:根外施用一定浓度的Put后,红掌根系的抗氧化酶活性、根系活力、叶片氮代谢水平、叶绿素含量、脯氨酸(Pro)含量明显提高,丙二醛(MDA)含量降低,且以1.0 mmol/L Put处理效果最佳,*D*-Arg处理加重了低温对红掌的伤害。说明Put参与了红掌的抗冷调节,根外施用一定浓度的Put能缓解低温胁迫对红掌生长的不利影响。

**关键词:** 红掌; 腐胺; 抗氧化酶; 氮代谢; 低温胁迫

**中图分类号:** S682.1<sup>+</sup>4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2018)01-0152-06

## Effects of exogenous putrescine and *D*-Arg on physiological and biochemical indices of anthurium under chilling stress

SUN Xiang-li<sup>1</sup>, WANG Yin<sup>2</sup>, TAN Jian-zhong<sup>1</sup>, WANG Bo<sup>1</sup>

(1. Department of Horticulture, Soochow University, Suzhou 215123, China; 2. Suzhou City Green Property Management Limited Company, Suzhou 215104, China)

**Abstract:** The alleviation of chilling stress by putrescine (Put) were studied on *Anthurium andraeanum* Alabamb subjected to different concentrations (0.5 mmol/L, 1.0 mmol/L, 1.5 mmol/L, 2.0 mmol/L) of Put and 1.0 mmol/L of *D*-Arg under 6℃ temperature. Physiological and biochemical indices were explored to indicate the alleviation. The antioxidant enzymes activities, root activity, level of nitrogen metabolism, chlorophyll content and proline (Pro) content of *Anthurium andraeanum* were significantly increased, but content of malondialdehyde (MDA) decreased. The treatment of 1.0 mmol/L Put showed the best effect. The chilling injury was deteriorated in the treatment of *D*-Arg. In conclusion, Put took part in the cold resistance regulation, and the adverse effects of chilling stress on the growth of *Anthurium andraeanum* were alleviated by using proper amount of Put.

**Key words:** anthurium; putrescine; antioxidant enzyme; nitrogen metabolism; chilling stress

收稿日期: 2017-07-06

基金项目: 江苏省高校自然科学研究项目(15KJB210004)

作者简介: 孙向丽(1982-), 女, 博士, 讲师, 主要从事花卉栽培生理研究。(Tel) 0512-65880206; (E-mail) sunxl@suda.edu.cn

红掌(*Anthurium andraeanum* Lindl) 又称安祖花、花烛, 为天南星科花烛属(*Anthurium*) 多年生草本植物。红掌原产于中南美洲热带雨林地区, 自然生长环境高温、多湿, 人工栽培冬季气温不能低于12℃, 因此在中国大多数地区只能采用设施栽培, 每年冬季加温消耗大量能源。提高红掌植株的抗冷性是解决低

温制约冬季栽培这一问题的有效途径。施用生长调节剂等外源物质是目前提高植物抗逆性的简便、有效和可行的方法之一。乔永旭<sup>[1]</sup>、田丹青等<sup>[2-3]</sup>、张彩凤等<sup>[4]</sup>研究了通过施用水杨酸、腐殖酸钾等外源物质提高红掌抗冷性的作用,并取得了一定成果。

多胺(Polyamine)是植物体内一类具有生物活性的低分子量脂肪族含氮碱的总称,具有刺激细胞分裂、促进生长、延缓衰老等方面的作用,主要包括腐胺(Put)、精胺(Spm)和亚精胺(Spd)等种类。D-精氨酸(D-Arg)是多胺合成过程中的重要酶——精氨酸脱羧酶的专一性竞争抑制剂,被普遍应用于多胺类物质调节植物响应逆境胁迫方面的研究。目前,关于多胺类物质参与农作物和经济作物逆境调节的研究报道较多<sup>[5-10]</sup>,但未见多胺类物质对于提高红掌抗冷性的研究成果。为了明确 Put 是否参与红掌的抗冷性调节,以及对低温胁迫下生理代谢的缓解作用及最佳适用浓度,本研究拟通过分析不同浓度的外源 Put 对低温胁迫下红掌生理生化指标的影响,为生产实践中利用外源 Put 缓解红掌冬季生产的低温伤害和降低能源消耗提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试红掌品种为阿拉巴马(Alabamb),为红色盆栽品种,购自苏州盈年农业科技有限公司。Put 和 D-Arg 为分析纯,购自北京百灵威科技有限公司。

### 1.2 试验方法

采用温室盆栽试验。试验开始时红掌为4个月苗龄,平均株高9 cm,平均冠幅11 cm;花盆高8 cm,直径9 cm,内含栽培基质200 ml,每盆1株。栽培基质配方为3份椰壳块:2份盆栽泥炭:1份珍珠岩,容质量为0.11 g/cm<sup>3</sup>,总孔隙度为86.53%,pH值为6.42,电导率(EC)为1.69 ms/cm,速效氮含量为342 mg/kg,速效磷含量为216 mg/kg,速效钾含量为307 mg/kg;营养供给为1/2 Hoagland 营养液,每盆150 ml,每周2次。试验期间温室光照度为10 000 lx,光照时间为12 h/d;白天气温保持在(25±1)℃,夜晚气温(22±1)℃;相对湿度(RH)70%~80%。共设7个处理,采用完全随机区组设计,每个处理45株,分3组布置(表1)。在预试验的基础上,确定低温胁迫温度为6℃,D-Arg的施用浓度为1.0 mmol/L。Put 和 D-Arg 均为根外施用,用量为每盆150 ml,每周1次。

表1 试验设计

Table 1 Test design

处理	温度 (℃)	腐胺浓度 (mmol/L)	D-精氨酸浓度 (mmol/L)
1(常温对照)	25	0	0
2(低温胁迫对照)	6	0	0
3	6	0.5	0
4	6	1.0	0
5	6	1.5	0
6	6	2.0	0
7	6	0	1.0

### 1.3 测定指标及方法

栽培1个月后进行低温处理,各处理分别随机选取30株带回实验室,放置于6℃恒温人工气候箱内(光照度6 000 lx,光照时间12 h/d,RH 80%)。低温处理0 d、1 d、2 d、3 d后各处理随机选取5株,分成地下部和地上部2部分,分别进行生理指标测定。3 d后停止低温胁迫,恢复至25℃,1 d(第4 d)后采用相同方法取样测定。地下部采用超声波清洗仪洗净根系附着的栽培基质,再用蒸馏水冲洗干净并用滤纸吸干,剪取前端健康根段用于抗氧化酶活性和根系活力的测定。地上部剪取从上向下第2片功能叶,用蒸馏水冲洗干净并用滤纸吸干水分,之后立即进行生理生化指标测定,试验重复3次。过氧化物酶(POD)活性测定采用愈创木酚法<sup>[11]</sup>,超氧化物歧化酶(SOD)活性测定采用NBT法<sup>[11]</sup>,过氧化氢酶(CAT)活性测定采用H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>法<sup>[11]</sup>,根系活力的测定采用TTC法<sup>[11]</sup>,MDA含量的测定采用TBA法<sup>[11]</sup>,Pro含量的测定采用茚三酮比色法<sup>[11]</sup>,叶绿素含量的测定采用丙酮浸提法<sup>[11]</sup>,硝酸还原酶(NR)活性的测定采用磺胺比色法<sup>[12]</sup>,硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)含量的测定采用水杨酸-浓硫酸比色法<sup>[12]</sup>,铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)含量的测定采用茚三酮比色法<sup>[12]</sup>。

### 1.4 数据分析

采用EXCEL 2003进行数据统计,采用SPSS 11.0进行方差分析和多重比较。

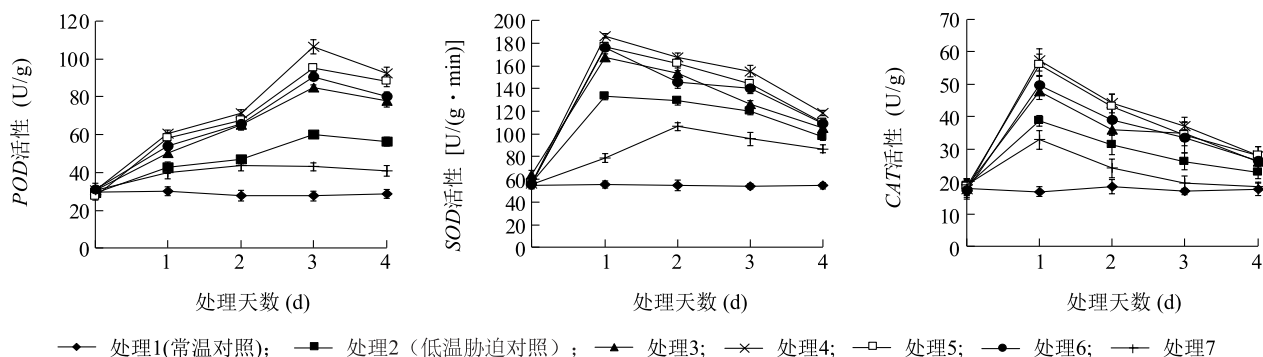
## 2 结果与分析

### 2.1 外源 Put 对低温胁迫下红掌根系抗氧化酶活性的影响

由图1可以看出,低温胁迫促使红掌根系

*POD*、*SOD* 和 *CAT* 活性提高。低温胁迫期间(0~3 d)添加 Put 的各处理和低温胁迫对照的 *POD* 活性呈持续上升趋势,并呈现出快-慢-快的变化规律,*D*-Arg 处理的 *POD* 活性呈先缓慢升高后又缓慢降低的趋势。*SOD* 活性和 *CAT* 活性先上升、后下降,最高值出现在低温胁迫后的第 1 d;*D*-Arg 处理的 *SOD* 活性和 *CAT* 活性也呈现先上升、后下降的趋势,最

高值分别出现在低温胁迫后的第 2 d 和第 1 d。低温处理结束时(第 3 d)处理 4 的 *POD*、*SOD* 和 *CAT* 活性均最高,显著高于其他处理( $P < 0.05$ ),其次是处理 5、处理 6、处理 3 和对照;*D*-Arg 处理的 *POD*、*SOD* 和 *CAT* 活性显著低于低温胁迫对照( $P < 0.05$ )。低温胁迫结束后各处理的抗氧化酶活性均逐步回落。



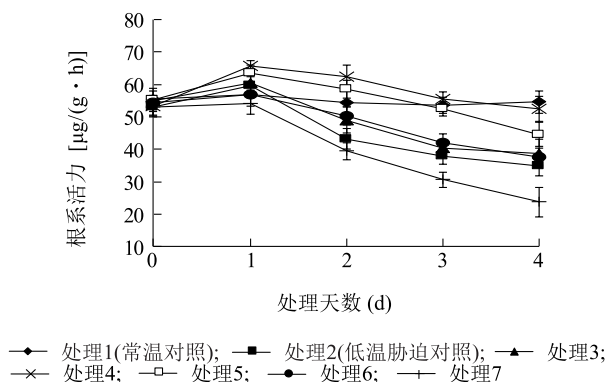
处理 3~处理 7 见表 1。

图 1 外源 Put 和 *D*-Arg 处理对低温胁迫下红掌根系 *POD*、*SOD* 和 *CAT* 活性的影响

Fig.1 Effect of exogenous Put and *D*-Arg treatment on the activity of *POD*, *SOD* and *CAT* of anthurium root under chilling stress

## 2.2 外源 Put 对低温胁迫下红掌根系活力的影响

低温胁迫下红掌根系活力短暂增大后逐渐降低,并在低温胁迫结束后持续降低(图 2)。低温胁迫结束时处理 4 的根系活力最大,与常温对照无显著差异( $P > 0.05$ ),其他处理的根系活力均低于常温对照。*D*-Arg 处理的根系活力的变化规律与 Put 处理的相似,但在处理期间均低于添加 Put 的各处理。



处理 3~处理 7 见表 1。

图 2 外源 Put 和 *D*-Arg 处理对低温胁迫下红掌根系活力的影响

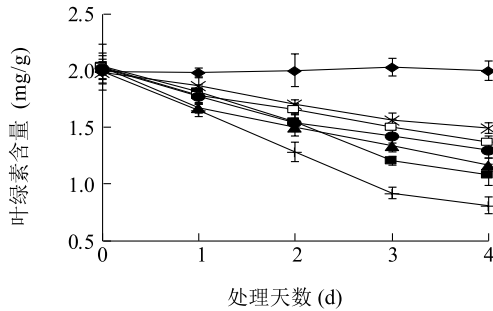
Fig.2 Effect of exogenous Put and *D*-Arg treatment on the root activity of anthurium under chilling stress

## 2.3 外源 Put 对低温胁迫下红掌叶片叶绿素、MDA 和 Pro 含量的影响

由图 3 可以看出,低温导致红掌叶片叶绿素含量降低。低温期间各处理的叶绿素含量均持续降低,低温胁迫结束后仍缓慢下降。外源 Put 能缓解叶绿素含量降低的速度,低温胁迫结束时添加 Put 的各处理叶绿素含量均显著高于低温胁迫对照( $P < 0.05$ ),且以处理 4 的缓解效果最为明显,*D*-Arg 处理的叶绿素含量最低。

在低温胁迫下,红掌叶片积累了大量 MDA,且随低温处理时间的延长持续增加,仅处理 4 在低温结束后 MDA 含量出现小幅回落(图 4)。低温胁迫结束时添加 Put 的各处理 MDA 含量均明显低于低温胁迫对照( $P < 0.05$ ),*D*-Arg 处理在低温胁迫结束时 MDA 含量最高,明显高于低温胁迫对照( $P < 0.05$ )。

在低温胁迫下,红掌叶片中 Pro 含量显著升高。添加 Put 的各处理和低温胁迫对照的 Pro 含量在低温处理期间持续上升,低温胁迫结束时处理 4 和处理 5 的 Pro 含量最高,其次为处理 6 和处理 3,均显著高于低温胁迫对照( $P < 0.05$ ),*D*-Arg 处理的则显

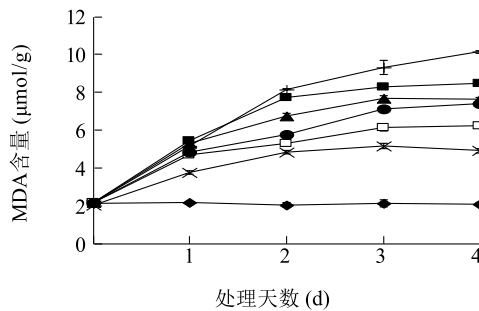


—●— 处理1(常温对照); —■— 处理2(低温胁迫对照); —▲— 处理3;  
—×— 处理4; —□— 处理5; —●— 处理6; —+— 处理7

处理3~处理7见表1。

图3 外源 Put 和 D-Arg 处理对低温胁迫下红掌叶绿素含量的影响

Fig.3 Effect of exogenous Put and D-Arg treatment on the content of chlorophyll of anthurium leaves under chilling stress



—●— 处理1(常温对照); —■— 处理2(低温胁迫对照); —▲— 处理3;  
—×— 处理4; —□— 处理5; —●— 处理6; —+— 处理7

处理3~处理7见表1。

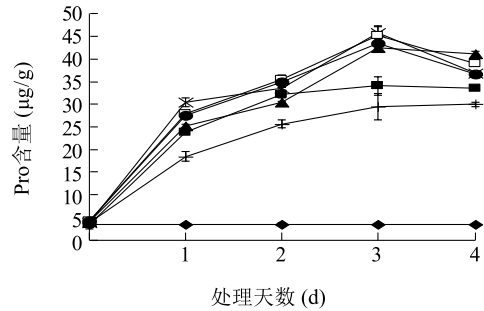
图4 外源 Put 和 D-Arg 处理对低温胁迫下红掌叶片 MDA 含量的影响

Fig.4 Effect of exogenous Put and D-Arg treatment on the content of MDA of anthurium leaves under chilling stress

著低于低温胁迫对照 ( $P < 0.05$ )。低温胁迫结束后处理4、处理5、处理6的 Pro 含量迅速回落,处理3和低温胁迫对照的缓慢降低,D-Arg 处理的仍继续上升(图5)。

## 2.4 外源 Put 对低温胁迫下红掌叶片氮代谢的影响

由图6、图7可知,在低温胁迫下,红掌叶片的 NR 活性和  $\text{NO}_3^-$ -N 含量均高于常温对照,随时间的推移均呈先升高后降低的变化规律,各处理均在低温处理的第1 d 达到峰值。第3 d 添加 Put 的各处理的 NR 活性和  $\text{NO}_3^-$ -N 含量均高于低温胁迫对照,而 D-Arg 处理的均低于低温胁迫对照;低温胁迫结



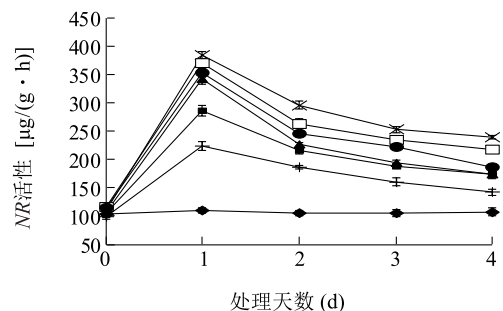
—●— 处理1(常温对照); —■— 处理2(低温胁迫对照); —▲— 处理3;  
—×— 处理4; —□— 处理5; —●— 处理6; —+— 处理7

处理3~处理7见表1。

图5 外源 Put 和 D-Arg 处理对低温胁迫下红掌叶片 Pro 含量的影响

Fig.5 Effect of exogenous Put and D-Arg treatment on the content of Pro of anthurium leaves under chilling stress

束后处理4的 NR 活性最高,显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ ),处理5和处理6的较高,这3个处理分别高出低温胁迫对照 34.07%、24.63%和 17.63%;处理3与低温胁迫对照的 NR 活性差异不显著 ( $P > 0.05$ );D-Arg 处理的 NR 活性仅为对照的 85.10%。低温胁迫结束后处理4、处理5、处理6的  $\text{NO}_3^-$ -N 含量分别高出低温胁迫对照 69.22%、55.79%和 21.13%,处理3与低温胁迫对照无显著差异 ( $P > 0.05$ ),D-Arg 处理的  $\text{NO}_3^-$ -N 含量仅为低温胁迫对照的 73.47%。



—●— 处理1(常温对照); —■— 处理2(低温胁迫对照); —▲— 处理3;  
—×— 处理4; —□— 处理5; —●— 处理6; —+— 处理7

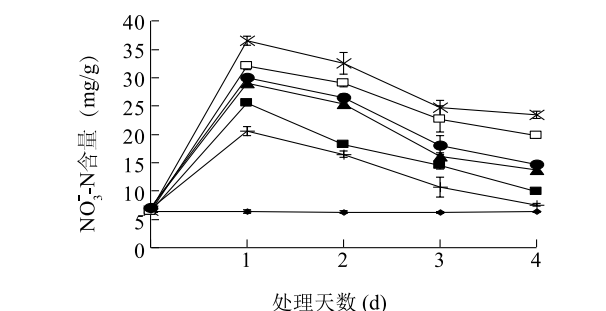
处理3~处理7见表1。

图6 外源 Put 和 D-Arg 处理对低温胁迫下红掌叶片 NR 活性的影响

Fig.6 Effect of exogenous Put and D-Arg treatment on the NR activity of anthurium leaves under chilling stress

由图8可知,在低温胁迫下,红掌叶片的  $\text{NH}_4^+$ -N 含量显著高于常温对照 ( $P < 0.05$ ),随时间的推移也呈现先升高后降低的变化规律。添加 Put 的各处理的  $\text{NH}_4^+$ -N 含量均在低温处理的第2 d 出现峰值,第



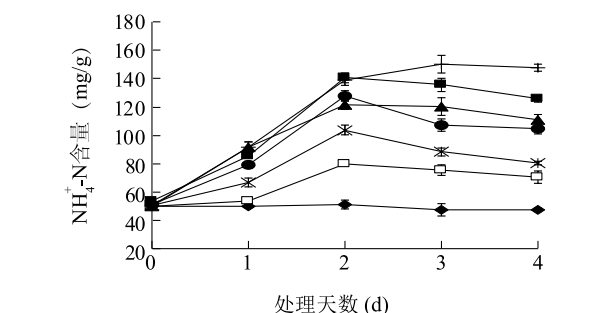


处理 3~处理 7 见表 1。

图 7 外源 Put 和 D-Arg 处理对低温胁迫下红掌叶片  $\text{NO}_3^-$ -N 含量的影响

Fig.7 Effect of exogenous Put and D-Arg treatment on the content of  $\text{NO}_3^-$ -N of anthurium leaves under chilling stress

3 d D-Arg 处理的  $\text{NH}_4^+$ -N 含量最高,显著高于低温胁迫对照 ( $P<0.05$ ),而添加 Put 的各处理的  $\text{NH}_4^+$ -N 含量均显著低于低温胁迫对照 ( $P<0.05$ ),处理 3、处理 6、处理 5、处理 4 的  $\text{NH}_4^+$ -N 含量分别为低温胁迫对照的 88.83%、79.20%、65.25%和 55.58%。



处理 3~处理 7 见表 1。

图 8 外源 Put 和 D-Arg 处理对低温胁迫下红掌叶片  $\text{NH}_4^+$ -N 含量的影响

Fig.8 Effect of exogenous Put and D-Arg treatment on the content of  $\text{NH}_4^+$ -N of anthurium leaves under chilling stress

## 2.5 低温胁迫对红掌外观表现的影响

各处理的红掌经 6℃ 低温胁迫 3 d、25℃ 常温恢复 1 d 后的外观表现如表 2 所示。可见,除常温对照外,处理 4 的植株受害程度最轻,外观表现优于低温胁迫对照和其他处理。D-Arg 处理的受害程度最高,所有试验植株均表现出明显的冷害症状。受害程度由低到高的排序为处理 4<处理 5<处理 6<处理 3<处理 2 (低温胁迫对照)<处理 7。

表 2 低温胁迫 3 d、恢复 1 d 后各处理的红掌外观表现

Table 2 Appearance of anthurium plants under different treatments after chilling stress for three days and recovery for one day

处理	植株外观表现描述
1 (常温对照)	植株挺立,100%的植株叶片挺拔,叶色正常
2 (低温胁迫对照)	植株初始萎蔫,叶片变软,20%的植株叶色正常,80%的植株叶片出现焦枯,焦枯面积大
3	植株初始萎蔫,叶片变软,60%的植株叶色正常,40%的植株叶片出现焦枯,焦枯面积大
4	植株挺立,叶片稍变软,100%的植株叶色正常
5	植株挺立,叶片稍变软,80%的植株叶色正常,20%的植株叶片出现焦枯,焦枯面积小
6	植株挺立,叶片稍变软,80%的植株叶色正常,20%的植株叶片出现焦枯,焦枯面积中等
7	植株萎蔫,叶片变软,100%的植株叶片出现焦枯,焦枯面积大

## 3 讨论

植物处于正常生长条件下时,体内活性氧产生与清除处于平衡状态,不会导致细胞伤害。一旦植物受到环境胁迫,这种平衡体系就会遭到破坏,自由基积累,质膜透性增加,细胞代谢紊乱,致使植物受到伤害<sup>[13]</sup>。此时,植物会迅速启动体内的保护系统,清除过剩的自由基,缓解环境胁迫对细胞造成的损伤。本试验结果表明,在低温胁迫下,红掌根系 POD 活性持续上升,SOD、CAT 活性和根系活力呈现先上升后下降的变化趋势,低温处理结束后各指标逐渐降低或继续降低,说明在低温胁迫发生时,红掌通过及时提高抗氧化酶活性积极适应环境变化,但不同抗氧化酶的响应速度不尽相同,本试验中 SOD 和 CAT 反应迅速,在胁迫发生的第 1 d 活性就达到了峰值,而 POD 活性则是稳步上升,直到胁迫发生的第 3 d 才达到峰值。随着胁迫时间延长,抗氧化酶的活性均有所降低,对红掌的保护作用逐渐减弱。Put 是一种有效的外源调节物质,0.5~2.0 mmol/L 的外源 Put 使红掌的 POD、SOD、CAT 活性和根系活力均得到提高,而添加 D-Arg 时各指标均明显低于低温胁迫对照,说明 Put 参与了低温胁迫下红掌体内的抗氧化酶活性和根系活力的调节,有利于红掌在低温胁迫下产生更多的保护物质并保持较高的活性,缓解低温伤害。

低温可破坏叶绿体和类囊体膜结构,影响叶片色素合成相关酶活性<sup>[14-16]</sup>,降低叶绿素合成,本试

验结果证明 0.5~2.0 mmol/L 的外源 Put 能一定程度上维持叶绿素的含量。低温胁迫会导致红掌叶片产生更多的氧自由基,加速膜脂过氧化产物 MDA 的积累,0.5~2.0 mmol/L 的外源 Put 能不同程度地降低 MDA 含量,从而减轻红掌受低温伤害的程度。红掌叶片的 Pro 含量与抗冷性强弱呈正相关,添加 Put 的各处理在低温胁迫下产生了更多的渗透调节物质,减轻了低温对细胞结构的损伤。D-Arg 处理则加剧了低温对红掌叶片的生理损伤。

非生物逆境严重影响植物对无机氮的吸收和利用,造成植物体细胞内氮代谢紊乱,引起无机态氮在植物体内积累<sup>[17]</sup>。本试验中添加 Put 的各处理在低温胁迫后 NR 活性和  $\text{NO}_3^-$ -N 含量均高于对照,  $\text{NH}_4^+$ -N 含量低于对照,与樊怀福等<sup>[18]</sup>研究黄瓜对盐胁迫反应的结果相似,表明 0.5~2.0 mmol/L 的外源 Put 能提高红掌根系 NR 活性,提高  $\text{NO}_3^-$ -N 含量,降低  $\text{NH}_4^+$ -N 积累,提高红掌的氮代谢水平,进而增强抗冷性。低温胁迫后 D-Arg 处理的 NR 活性和  $\text{NO}_3^-$ -N 含量低于对照,  $\text{NH}_4^+$ -N 含量高于对照,证明 Put 参与了红掌的氮代谢调节,而 D-Arg 的抑制作用可能同时导致了叶绿素合成受阻和氮代谢水平降低,进一步加剧了红掌叶片失绿。

本试验结果表明,0.5~2.0 mmol/L 的外源 Put 能提高低温下红掌根系抗氧化酶的活性,增强根系活力,维持根系较高的氮代谢水平和叶绿素含量,促进 Pro 合成,抑制 MDA 含量升高,缓解低温对红掌生长的不利影响,且以 1.0 mmol/L 的外源 Put 效果最好, D-Arg 处理加剧了低温对红掌的伤害,证明 Put 参与了红掌的抗冷调节。可见,施用适宜浓度的外源 Put 能有效缓解低温对红掌生长的抑制作用,从而达到以较低的成本获得较好的冬季栽培效果。但低温下红掌体内 Put 含量的变化规律、作用机理及外源 Put 的诱导机理尚需进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 乔永旭. 低温处理过程中水杨酸对红掌叶片生理指标的影响[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(2): 11-12.
- [2] 田丹青, 葛亚英, 刘晓静, 等. 叶面喷施水杨酸对红掌植株抗寒性的影响[J]. 浙江农业学报, 2011, 23(2): 304-308.
- [3] 田丹青, 葛亚英, 潘刚敏, 等. 不同外源物质处理对红掌抗寒性的影响[J]. 浙江农业科学, 2012(8): 1142-1144.
- [4] 张彩凤, 王慧, 潘虹, 等. 低温胁迫下叶面喷施腐植酸钾对红掌生理生化指标的影响[J]. 山西农业科学, 2015, 43(2): 167-171, 191.
- [5] 姜喜艳. 多胺浸种对干旱胁迫下小麦周麦 18 种子萌发的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(9): 73-76.
- [6] CHOUDHARY S P, ORAL H V, BHARDWAJ R, et al. Interaction of brassinosteroids and polyamines enhances copper stress tolerance in *Raphanus sativus* [J]. Journal of Experimental Botany, 2012, 63(63): 5659-5675.
- [7] ALCAZÁR R, BITRIÁN M, BARTELS D, et al. Polyamine metabolic canalization in response to drought stress in *Arabidopsis* and the resurrection plant *Craterostigma plantagineum* [J]. Plant Signaling and Behavior, 2011, 6(2): 243-250.
- [8] MARIA P C, CESAR D B, ANDREA C O. Polyamine catabolism is involved in response to salt stress in soybean hypocotyls [J]. Journal of Plant Physiology, 2011, 168(11): 1234-1240.
- [9] BASSIE L, CHRISTOU P, CAPELL T. Modulation of the polyamine biosynthetic pathway in transgenic rice confers tolerance to drought stress [J]. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America, 2004, 101(26): 9909-9914.
- [10] 王尚堃, 杜红阳. 多胺及其合成抑制剂对干旱胁迫下杏苗生理指标的影响[J]. 南方农业学报, 2016, 47(9): 1475-1479.
- [11] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [12] TACHIBANA S, KONISHI N. Diurnal variation of in vivo and in vitro nitrate reductase activity in cucumber plants [J]. Journal of the Japanese Society for Horticultural Science, 1991, 60: 593-599.
- [13] KANAZAWA S, SANO S, KOSHIBA T, et al. Changes in antioxidative in cucumber cotyledons during natural senescence comparison with those during dark-induced senescence [J]. Physiologia Plantarum, 2000, 109(2): 211-216.
- [14] EFEOLGU B, TERZIOGLU S. Photosynthetic responses of two wheat varieties to high temperature [J]. Eur-Asian Journal of Biosciences, 2009(3): 97-106.
- [15] AIENL A, KHETARPAL S, PAL M. Photosynthetic characteristics of potato cultivars grown under high temperature [J]. American Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Science, 2011, 11(5): 633-639.
- [16] REDA F, MANDOURA H. Response of enzymes activities, photosynthetic pigments, proline to low or high temperature stressed wheat plant (*Triticum aestivum* L.) in the presence or absence of exogenous proline or cysteine [J]. International Journal of Academic Research, 2011(3): 108-115.
- [17] WUNNA H, JOGLOY S, TOOMSAN B. Response to early drought for traits related to nitrogen fixation and their correlation to yield and drought tolerance traits in peanut (*Arachis hypogaea* L.) [J]. Asian Journal of Plant Sciences, 2009, 8(2): 138-145.
- [18] 樊怀福, 郭世荣, 杜长霞, 等. 外源 NO 对 NaCl 胁迫下黄瓜幼苗氮化合物和硝酸还原酶活性的影响[J]. 西北植物学报, 2006, 26(10): 2063-2068.

(责任编辑:张震林)