

梁丽建, 邓衍明, 孙晓波, 等. 外源 NO 对低温胁迫下红掌耐寒性诱导的研究[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(1): 82–85.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.01.021

# 外源 NO 对低温胁迫下红掌耐寒性诱导的研究

梁丽建<sup>1</sup>, 邓衍明<sup>1</sup>, 孙晓波<sup>1</sup>, 贾新平<sup>1</sup>, 瞿 辉<sup>2</sup>, 苏家乐<sup>1</sup>

(1. 江苏省农业科学院休闲农业研究所, 江苏南京 210014; 2. 江苏省园艺技术推广站, 江苏南京 210036)

**摘要:**以红掌品种阿拉巴马 1 年生植株为试验材料, 研究不同浓度 NO 供体硝普钠(sodium nitroprusside, SNP)溶液, 对低温 12 ℃/5 ℃(白天/夜间)胁迫处理下红掌幼苗生长和生理特性的影响。结果表明, 在低温胁迫下, 外源 SNP 处理可以使红掌植株的株高、干质量、含水量和根冠比得到提高; 同时, 可以有效地抑制电导率和 MDA 含量的上升, 显著提高叶绿素和脯氨酸含量, 延缓 SOD、POD 和 CAT 等抗氧化酶活性的下降。此外, 0.2 mmol/L SNP 是缓解红掌寒害的最适浓度, 过高浓度的外源 SNP 对低温胁迫下红掌幼苗生长的缓解作用不显著。

**关键词:**低温胁迫; 外源 NO; 红掌; 抗寒性

**中图分类号:** S682.1<sup>+</sup>40.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)01-0082-03

红掌(*Anthurium andraeanum*), 别称安祖花, 为天南星科花烛属多年生附生常绿草本植物, 主要原产地为南美洲热带和亚热带雨林地区。红掌花朵鲜艳夺目、花姿奇特美妍、花期持久, 是世界畅销的热带花卉, 具有极高的观赏价值和经济价值<sup>[1]</sup>。但红掌是喜温花卉, 抗寒性较差, 在我国长江中下游及以北地区栽培时冬季需要设施加温保护, 增加了生产成本, 同时也影响了花的品质和产量<sup>[2]</sup>。因此, 研究提高红掌的耐寒性措施及机理对我国红掌产业的健康发展至关重要。而利用外源信号物质提高植物抗性是一种经济有效的措施, 目前已成为红掌逆境生理研究的重点领域。

一氧化氮(nitric oxide, NO)是植物体内普遍存在的一种气体信号分子, 在调节植物的生长发育、种子萌发、气孔运动和诱导植物抗逆性等方面发挥着十分重要的作用<sup>[3-4]</sup>。近年来, NO 介导植物对低温、干旱、盐害等非生物胁迫的抗性研究越来越受到人们的重视, 已有大量研究表明, 外源应用 NO 可以有效缓解低温对植物生长的抑制作用、促进植物的光合作用、稳定细胞膜的结构、增强植物细胞保护系统的功能, 提高细胞清除活性氧的能力, 减少低温胁迫对植物细胞造成的氧化损伤, 从而提高植物的抗寒性<sup>[5]</sup>。但是, 目前这些研究主要在果树、蔬菜、大田作物及一些主要的园林植物中进行<sup>[6-8]</sup>, 且在适用的处理浓度方面存在较大的争议, 而有关 NO 对于热带花卉影响的研究资料甚少, 尤其是涉及 NO 对红掌幼苗抗寒作用机理方面的研究尚未见报道。因此, 本研究以红掌幼苗为研究对象, 通过外源喷施 NO, 初步探讨不同浓度的外源 NO 对低温胁迫条件下红掌幼苗生长和生理的影响, 以期揭示 NO 提高红掌耐寒的生理机制, 为制定红掌低温

冷害的有效防御措施提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试所用材料为红掌品种阿拉巴马, 生长健壮, 苗龄 1 年左右, 具有 5~6 片叶, 由荷兰安祖公司提供。NO 供体为硝普钠[Na<sub>2</sub>Fe(CN)<sub>5</sub>, 代号 SNP]购自于 Sigma 公司。

### 1.2 试验处理

试验处理于 2015 年 8—10 月在江苏省农业科学院内进行。8 月上旬选取长势均一、无病、无损伤的红掌幼苗, 置于人工气候培养箱中预培养 3 d, 培养温度 27 ℃/22 ℃(白天/夜间), 光照度 10 000 lx, 光照时间 12 h/d, 相对湿度 80%。预处理结束后, 按照如下试验设计进行叶面喷施: (1) CK(常温 + 蒸馏水); (2) T<sub>0</sub>(低温 + 蒸馏水); (3) T<sub>1</sub>(低温 + 200 μmol/L SNP); (4) T<sub>2</sub>(低温 + 400 μmol/L SNP); (5) T<sub>3</sub>(低温 + 800 μmol/L SNP)。叶面喷施以叶面分布均匀欲滴为度, 每 2 d 喷施 1 次, 连续喷施 2 次。每处理 3 个重复, 每个重复 15 株。叶面喷施结束 24 h 后, 将 CK 置于 27 ℃/22 ℃常温培养箱中培养, 其余各组置于 12 ℃/15 ℃低温培养箱中培养, 其它培养条件与预处理相同, 培养 15 d 后取样进行各项指标测定。

### 1.3 测定项目与方法

分别采取每株红掌从上往下数第 1 片成熟叶进行生理指标的测定。电导率、丙二醛(MDA)、叶绿素与脯氨酸含量测定参照黄芳等的方法<sup>[9]</sup>; SOD、POD 和 CAT 活性的测定参照许楠等的方法<sup>[10]</sup>; 各项指标测定时重复 3 次, 取平均值。处理 15 d 后, 分别用水冲松盆土, 取出幼苗, 清洗干净, 进行植株生长指标测定。用钢尺测量幼苗的株高, 用电子天平测定植株的鲜质量, 用烘干法测量植株地上部分与地下部分干质量。根据干鲜质量测得含水量及根冠比, 含水量 = (鲜质量 - 干质量)/鲜质量 × 100%, 根冠比 = 地下部分干质量/地上部分干质量。

### 1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 和 SPSS 进行数据处理, 并对平均数

收稿日期: 2016-08-09

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金[编号: CX(14)5053]; 江苏省农业三新项目[编号: SXGC(2015)290]。

作者简介: 梁丽建(1985—), 女, 硕士, 助理研究员, 主要从事花卉遗传育种研究。E-mail: ama166@163.com。

通信作者: 苏家乐, 硕士, 研究员, 主要从事花卉遗传育种与高效栽培研究。E-mail: suj166@163.yahoo.com.cn。

用 Duncan's 新复极差法进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 NO 对低温胁迫下红掌植株生长的影响

低温胁迫抑制了红掌植株的正常生长,  $T_0$  组(低温 + 蒸馏水)的株高、干质量、含水量和根冠比均低于 CK, 分别为 CK 的 93.81%、92.31%、94.43%、94.23%。SNP 处理能有效地缓解这种抑制作用, 但随着 SNP 处理浓度的增加缓解效果呈下降趋势。 $T_1$  组(低温 + 200  $\mu\text{mol/L}$  SNP)展示出最强的缓解作用, 其株高、干质量、含水量和根冠比均显著高于  $T_0$  组, 分别为  $T_0$  组的 1.06、1.06、1.04、1.06 倍。 $T_3$  组的缓解作用较差, 其株高、干质量、含水量与根冠比与  $T_0$  组无明显差异(表 1)。

### 2.2 NO 对低温胁迫下红掌叶片膜透性与 MDA 含量的影响

低温胁迫下与 CK 相比,  $T_0$  组红掌植株的膜透性与 MDA

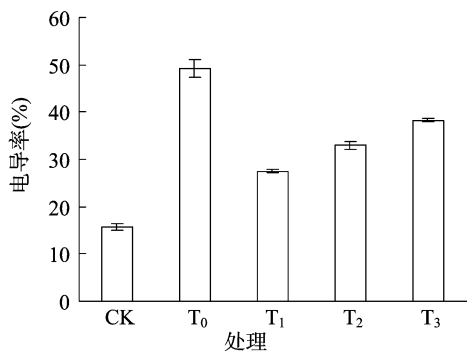
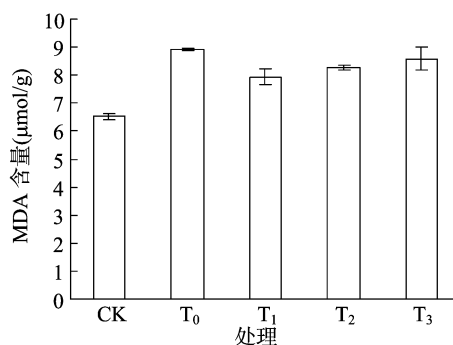


图1 NO 对低温胁迫下红掌叶片膜透性与 MDA 含量的影响

表 1 外源 NO 对低温胁迫下红掌幼苗形态指标的影响

处理	株高 (cm)	干质量 (g)	含水量 (%)	根冠比
CK	9.22 ± 0.43	0.52 ± 0.02	91.59 ± 0.5	0.53 ± 0.02
$T_0$	8.65 ± 0.12	0.48 ± 0.03	86.49 ± 1.23	0.49 ± 0.04
$T_1$	9.17 ± 0.31	0.51 ± 0.02	90.18 ± 0.41	0.52 ± 0.01
$T_2$	8.91 ± 0.22	0.50 ± 0.02	88.21 ± 0.51	0.50 ± 0.02
$T_3$	8.75 ± 0.62	0.49 ± 0.01	86.96 ± 0.69	0.49 ± 0.04

含量均显著提高, 分别为 CK 的 3.13、1.36 倍。SNP 处理显著减缓了这种升高, 但随着处理浓度的增加缓解效果呈下降趋势。在胁迫 15 d 后,  $T_1$  组缓解低温胁迫的效果最好, 其电导率和 MDA 含量仅为  $T_0$  组的 55.84%、88.88%;  $T_2$  组次之, 为  $T_0$  组的 66.96%、90.6%;  $T_3$  组的缓解作用最差, 为  $T_0$  组的 77.78%、96.19% (图 1)。



### 2.3 NO 对低温胁迫下红掌叶片叶绿素含量的影响

与 CK 相比, 低温胁迫下红掌叶片叶绿素含量均显著下降, 各低温处理组中,  $T_0$  组下降幅度最大, 15 d 后仅为 CK 的 32.76%。SNP 各处理组中,  $T_1$  组缓解低温胁迫的效果最好,

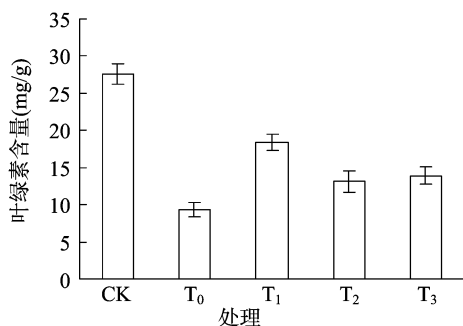
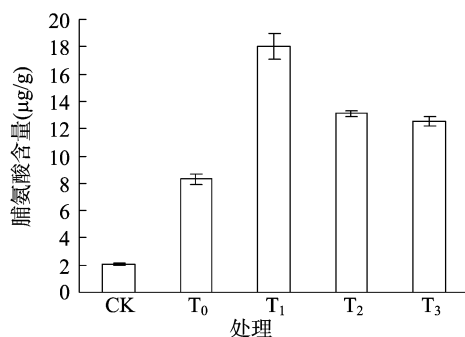


图2 NO 对低温胁迫下红掌叶片叶绿素和脯氨酸含量的影响

在胁迫 15 d 后, 叶绿素含量显著高于其他处理组, 为 CK 的 66.51%;  $T_3$  组次之, 叶绿素含量为 CK 的 50.54%;  $T_3$  组的缓解作用最差, 叶绿素含量为 CK 的 47.75% (图 2)。



### 2.4 NO 对低温胁迫下红掌叶片脯氨酸含量的影响

低温胁迫组( $T_0$ 、 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ )与常温 CK 组相比, 红掌叶片脯氨酸含量均显著提高。其中 SNP 处理组的增幅均显著高于  $T_0$  组, 且随着 SNP 浓度的提高增幅逐渐缩小。在胁迫处理 15 d 后,  $T_1$  组脯氨酸含量增加最多, 为 CK 的 8.79 倍;  $T_2$ 、 $T_3$  组次之, 分别为 CK 的 6.39、6.11 倍;  $T_0$  组的增幅最小, 为 CK 的 4.03 倍。

### 2.5 NO 对低温胁迫下红掌抗氧化酶活性的影响

在低温胁迫处理 15 d 后, 各胁迫组的 SOD 和 CAT 活性均显著低于 CK 组, SNP 各处理组的降幅均显著小于  $T_0$  组, 且随着 SNP 浓度的提高增幅逐渐增加。SOD 活性降幅由大

到小依次为  $T_0 > T_3 > T_2 > T_1$ , 分别为 CK 的 51.59%、62.61%、71.87%、78.66%; CAT 活性降幅由大到小依次为  $T_0 > T_3 > T_2 > T_1$ , 分别为 CK 的 17.6%、18.16%、20.15%、32.82%。各胁迫组的 POD 活性均显著高于 CK 组, POD 活性增幅由大到小依次为  $T_1 > T_2 > T_0 > T_3$ , 分别为 CK 的 2.86、1.31、1.3、1.02 倍(图 3)。

## 3 讨论与结论

### 3.1 NO 对低温胁迫下红掌植株形态指标的影响

低温胁迫会导致植物发育迟缓, 抑制植物组织和器官的生长与分化, 形态学指标能很好地反映植株幼苗损伤状

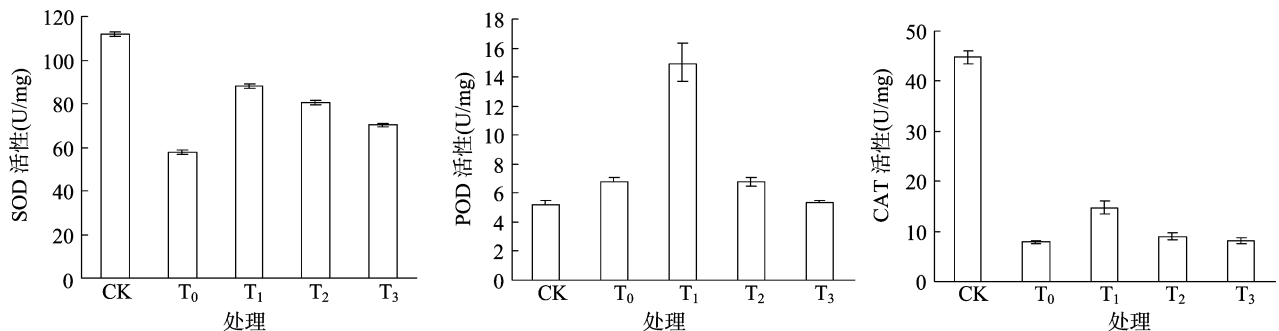


图3 NO 对低温胁迫下红掌叶片抗氧化酶活性的影响

态<sup>[11]</sup>。和红云在对甜瓜的研究中发现,低温胁迫下甜瓜幼苗的生长速率会有所下降,幼苗的高度、株叶面积、干物质的量增加缓慢<sup>[12]</sup>。张艳艳等研究发现,适量浓度外源 NO 能缓解盐害对玉米幼苗的生长抑制作用,增强玉米幼苗的抗盐性<sup>[13]</sup>。在本试验中,低温胁迫抑制了红掌幼苗的生长,低温胁迫组的株高、干质量、含水量和根冠比均低于 CK 组,但 NO 处理显著缓解了这种抑制作用,且随着 NO 浓度的升高缓解作用下降(表 1)。这说明较低浓度的 NO 即可缓解红掌寒害,较高的 NO 浓度对低温胁迫下红掌幼苗生长的缓解作用不显著,这与郭经纬等对豇豆的研究结果<sup>[14]</sup>相似。

### 3.2 NO 对低温胁迫下红掌叶片膜透性与 MDA 含量的影响

细胞膜是低温伤害作用于植物细胞的原初部位,电子泄露和 MDA 含量的增加是细胞膜氧化性损伤的重要表现。汤红玲等研究发现,在低温条件下通过外施 0.15 mmol/L SNP 能显著降低香蕉幼苗的电导率,抑制 MDA 的积累,从而缓解香蕉幼苗所受的低温伤害<sup>[15]</sup>。本研究发现,在低温胁迫下,未经 SNP 处理的红掌幼苗电导率显著增大,加速了电解质的外渗,导致了 MDA 的大量积累。而外源喷施 SNP 能显著降低电导率,缓解 MDA 的积累,但是随着浓度的增加,缓解效果呈下降趋势(图 1)。这些暗示了 NO 可以通过稳定膜结构来提高植物耐寒性。

### 3.3 NO 对低温胁迫下红掌叶片叶绿素与脯氨酸含量的影响

叶绿素含量是植物耐寒性的重要生理指标之一,低温胁迫下,植物叶片叶绿素合成会受到抑制,抗寒性较强的植物叶绿素含量会高于抗寒性较弱的植物<sup>[16]</sup>。外源应用 NO 能够阻止低温胁迫条件下叶绿素含量的下降,缓解低温胁迫对植物光合作用的抑制作用<sup>[17]</sup>。脯氨酸是植物体内重要的渗透调节物质,低温胁迫下,植物可通过脯氨酸的积累来减轻伤害<sup>[18]</sup>。莫亿伟等在对柱花草抗寒性的研究中发现,外源喷施 SNP 能促进植物体内脯氨酸的积累<sup>[19]</sup>。在本试验中,低温导致了红掌叶片叶绿素含量的下降和脯氨酸的积累,但 SNP 处理能显著抑制叶绿素的下降,同时也增加脯氨酸的积累(图 2),这与于秀针等的研究结果<sup>[20]</sup>相一致,这些结果暗示了 NO 或许可以通过促进低温胁迫条件下植物的光合作用和参与渗透调节来提高植物耐寒性。

### 3.4 NO 对低温胁迫下红掌叶片抗氧化酶活性的影响

SOD、POD 和 CAT 是植物体内重要的抗氧化酶,它们协同作用可以清除植物体内多余的活性氧自由基,减轻活性氧自由基对细胞膜造成的伤害,从而缓解低温对植物造成的伤

害<sup>[21]</sup>。Fan 等研究表明,外源 NO 能显著提升盐胁迫下黄瓜幼苗的 SOD、POD 和 CAT 活性,减少 MDA 和活性氧的产生和积累,从而提高其对盐害的忍耐性<sup>[22]</sup>。在本研究中,低温胁迫显著抑制了 SOD 和 CAT 的活性,这可能是由于胁迫已经超出红掌植株的忍受范围,活性氧大量生成,抗氧化系统受到了抑制。这一结果与牟雪娇等的结果<sup>[23]</sup>相一致。外源应用 NO 能显著缓解这种抑制,可能是由于其本身相当于一种抗氧化剂,对低温胁迫产生的活性氧具有一定的清除作用,从而缓解低温胁迫下 SOD 和 CAT 活性的下降,提高了红掌幼苗对寒冷的适应性(图 3)。低温胁迫显著促进了 POD 活性,外源应用 NO 能显著增加这种促进,但随着 NO 浓度的升高促进作用下降(图 3)。这些结果说明低温胁迫使红掌幼苗受到伤害,外源应用 SNP 能够通过增强 POD 活性来缓解低温胁迫的伤害。

综上所述,在低温胁迫下,外源应用低浓度 NO 可以通过调整自身生长、叶绿素和脯氨酸含量及抗氧化酶活性等来提高植株对低温的适应能力,从而有效地防止膜质过氧化程度和活性氧对植株的伤害。

### 参考文献:

- [1] 梁丽建,邓衍明,贾新平,等. 红掌高效再生技术研究[J]. 江苏农业科学,2015,43(12):45-47.
- [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] Corpas F J, Barroso J B, Carreras A, et al. Constitutive arginine-dependent nitric oxide synthase activity in different organs of pea seedlings during plant development[J]. Planta, 2006, 224(2): 246-254.
- [4] Neill S J, Desikan R, Clarke A, et al. Nitric oxide is a novel component of abscisic acid signaling in stomatal guard cells[J]. Plant Physiology, 2002, 128(1): 13-16.
- [5] 杨美森,王雅芳,干秀霞,等. 外源一氧化氮对冷害胁迫下棉花幼苗生长、抗氧化系统和光合特性的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(15): 3058-3067.
- [6] 吴锦程,陈伟建,蔡丽琴,等. 外源 NO 对低温胁迫下枇杷幼果抗氧化能力的影响[J]. 林业科学, 2010, 46(9): 73-78.
- [7] 樊怀福,杜长霞,朱祝军. 外源 NO 对低温胁迫下黄瓜幼苗生长、叶片膜脂过氧化和光合作用的影响[J]. 浙江农业学报, 2011, 23(3): 538-542.
- [8] 蒙钟文,张静,陈怡平. CO<sub>2</sub> 激光与外源 NO 对低温胁迫小麦的防护效应[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(5): 566-570.

吴桂容,王上伟,苏德生,等. 3 个牡丹品种花期进程中花瓣的生理生化特征[J]. 江苏农业科学,2018,46(1):85-87.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.01.022

# 3 个牡丹品种花期进程中花瓣的生理生化特征

吴桂容<sup>1</sup>, 王上伟<sup>2</sup>, 苏德生<sup>3,4</sup>, 张 萍<sup>3,4</sup>, 卢云天<sup>3,4</sup>

(1. 贺州学院化学与生物工程学院, 广西贺州 542800; 2. 福建省政和县林业局, 福建政和 353600;

3. 福建省政和县镇前镇油用牡丹专业合作社, 福建政和 353600; 4. 福建富之卿牡丹科技发展有限公司, 福建福州 350000)

**摘要:**以 3 个牡丹品种乌龙捧盛、香玉、景玉为研究对象,分别测定花期进程中花瓣的可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸等物质含量及超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性、丙二醛(MDA)含量。结果表明,3 个牡丹品种花期初始阶段花瓣中可溶性糖和可溶性蛋白含量上升,到开花盛期和末期其含量不断下降,且花瓣中的抗逆物质脯氨酸的含量开始不断下降,抗氧化酶 SOD、POD 含量不断下降,且过氧化物 MDA 的累积不断增加。花瓣中营养物质、抗逆物质、抗氧化酶的含量越高,过氧化物的累积量越少则能延缓花瓣的衰老,维持更长的花期持续时间。3 种牡丹品种中乌龙捧盛的抗逆性更强,花期持续时间更长,且其花更为优美,是最适宜本地栽培的品种。

**关键词:**牡丹;花期进程;花瓣;生理生化特征;抗逆性

**中图分类号:** S685.110.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)01-0085-03

牡丹(*Paeonia suffruticosa*)为芍药科芍药属多年生落叶小灌木,是我国特有的传统名花,具有极高的观赏、药用和经济价值。牡丹的花期及其持续时间是影响其观赏价值和市场开发的关键因素,研究牡丹花期进程中生理、生化特征的改变,延长开花质量和花期持续时间具有重要的意义<sup>[1-2]</sup>。目前,已有一些研究对开花进程中牡丹的生理生化特征进行了研究,如郭丽丽等对盆栽与地栽牡丹花芽的生理生化特性动态进行了研究,指出不同栽培方式的牡丹花芽营养和抗氧化酶系统等生理生化参数有较大差别,但在花期进程中有着相似

的变化趋势<sup>[3]</sup>;张圣旺等对牡丹花衰老过程中的生理生化特征进行了研究,指出细胞质膜透性、超氧化毒害是影响牡丹花衰老的决定性因素<sup>[4]</sup>,但这些研究系统性尚较差。因此,本研究对不同牡丹品种乌龙捧盛、景玉、香玉花期进程中的可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、丙二醛(MDA)等营养、渗透调节物质及抗氧化酶系统进行比较研究,从而为牡丹花期中衰老进程提供一定的参考,并筛选出适合引种栽培推广的牡丹品种。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于福建省南平市政和县镇前镇,地处武夷山鹭峰山脉北端,位于闽东北结合部,118°56'~119°16'E,27°08'~

收稿日期:2016-08-25

基金项目:福建省花卉苗木品种引进与研发创新项目。

作者简介:吴桂容(1970—),女,广东陆丰人,博士,教授,主要从事植物生理及生态研究。E-mail: hzwgr510@163.com。

[9] 黄 芳,李茂富,汪良驹,等. 叶施和根灌 ALA 对香蕉幼苗冷害的缓解效应[J]. 农业科学与技术:英文版,2013,14(6):858-862.

[10] 许 楠,孙广玉. 低温锻炼后桑树幼苗光合作用和抗氧化酶对冷胁迫的响应[J]. 应用生态学报,2009,20(4):761-766.

[11] 别之龙,黄丹枫. 工厂化育苗原理与技术[M]. 北京:中国农业出版社,2008.

[12] 和红军. 低温胁迫对甜瓜幼苗生长及生理生化的影响[D]. 石河子:石河子大学,2008.

[13] 张艳艳,刘 俊,刘友良. 一氧化氮缓解盐胁迫对玉米生长的抑制作用[J]. 植物生理与分子生物学学报,2004,30(4):455-459.

[14] 郭经纬,商 桑,穆大伟,等. 外源 NO 对低温胁迫下豇豆幼苗生长和生理特性的影响[J]. 热带作物学报,2015,36(12):2179-2183.

[15] 汤红玲,李 江,陈惠萍. 外源一氧化氮对香蕉幼苗抗冷性的影响[J]. 西北植物学报,2010,30(10):2028-2033.

[16] 何 云,李贤伟,龚 伟. 2 种野生岩生植物叶片游离脯氨酸和叶绿素含量对低温胁迫的响应[J]. 江苏农业科学,2011,39(5):473-476.

[17] Ruelland E, Zachowski A. How plants sense temperature[J]. Environmental and Experimental Botany,2010,69(3):225-232.

[18] Aghdam M S, Asghari M, Farmani B, et al. Impact of postharvest brassinosteroids treatment on PAL activity in tomato fruit in response to chilling stress[J]. Scientia Horticulturae,2012,144(6):116-120.

[19] 莫伟伟,钱善勤,陈泰林. 水杨酸和硝普钠处理增强柱花草抗寒性[J]. 草业科学,2010,27(11):77-81.

[20] 于秀针,张彩虹,姜鲁艳,等. 外源 NO 对低温胁迫下番茄种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 北方园艺,2014(22):5-8.

[21] 惠竹梅,王智真,胡 勇,等. 24-表油菜素内酯对低温胁迫下葡萄幼苗抗氧化系统及渗透调节物质的影响[J]. 中国农业科学,2013,46(5):1005-1013.

[22] Fan H F, Guo S R, Jiao Y S, et al. Effects of exogenous nitric oxide on growth, active oxygen species metabolism, and photosynthetic characteristics in cucumber seedlings under NaCl stress[J]. Frontiers of Agriculture in China,2007,1(3):308-314.

[23] 牟雪蛟,刘理想,孟鹏鹏,等. 外源 NO 缓解蝴蝶兰低温胁迫伤害的生理机制研究[J]. 西北植物学报,2015,35(5):978-984.