

何培磊, 叶自慧, 孙延军, 等. ALA 对菊花抗氧化酶系统光照胁迫效应的缓解作用[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(1): 107–111.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.01.019

# ALA 对菊花抗氧化酶系统光照胁迫效应的缓解作用

何培磊<sup>1,2</sup>, 叶自慧<sup>3</sup>, 孙延军<sup>3</sup>, 周厚高<sup>1</sup>

(1. 仲恺农业工程学院, 广东广州 510225; 2. 广东生态工程职业学院, 广东广州 510520;

3. 深圳园林股份有限公司, 广东深圳 518000)

**摘要:**以切花菊品种 D3 为试验材料, 研究喷施 0、100、200 mg/L 3 种浓度 ALA 对 0%、25%、50% 3 种光照胁迫菊花的逆境环境下抗氧化酶系统的影响。结果表明, 随着遮阳程度的增加, 菊花叶片内 SOD、POD 和 CAT 活性在降低, 其中 POD 和 CAT 活性随着遮阳时间的延长而降低。ALA 的喷施能够缓解逆境环境给菊花抗氧化酶系统带来的部分影响。

**关键词:**菊花; 光照胁迫; 抗氧化酶系统

**中图分类号:** S682.1+10.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2021)01-0107-05

菊花 (*Chrysanthemum × morifolium* Ramat.) 是典型的阳性植物, 生产中需要良好的光照条件, 在温室设施栽培中可能存在光照不足的问题, 或在某些生长阶段, 如在切花采切之前需要适当遮阴以提高花色的质量。本研究旨在探讨光照胁迫下菊花重要抗逆生理反应以及喷施 ALA (5-氨基乙酰丙酸, 5-aminolevulinic acid) 处理对此类抗逆反应的缓解效应。

ALA 是所有卟啉类化合物合成的关键前体, 早已引起研究者的重视<sup>[1]</sup>。ALA 能够直接启动脂质过氧化反应<sup>[2]</sup>和间接启动光氧化反应<sup>[3]</sup>。ALA 是一种  $\alpha$ -酮, 在有氧和微碱性条件下可自动烯醇化并生成  $O_2^{\cdot-}$ 、 $H_2O_2$  和  $\cdot OH$  等活性氧自由基<sup>[2,4]</sup>。ALA 在提高植物的抗冷、耐盐性、耐弱光性上有很大的应用前景<sup>[5-6]</sup>。关于逆境对植物抗氧化酶系统方面的影响研究和报道已经有很多<sup>[7-11]</sup>, 如水胁迫<sup>[7]</sup>, 重金属砷、铝胁迫<sup>[8,11]</sup>, 干旱胁迫对抗氧化酶系统的影响。

ALA 可显著提高植物的抗逆性, 缓解各种非生物逆境胁迫对植物生长、生理生化和光合作用的影响, 在 ALA 缓解各类胁迫效应方面, 近年学者们做

了不少的研究, 取得了一些进展<sup>[12-17]</sup>。ALA 能缓解盐胁迫对喜树幼苗<sup>[12]</sup>、花椰菜幼苗<sup>[13]</sup>、黄瓜幼苗<sup>[14]</sup>抗氧化酶活性的影响, 能改善 NaCl 胁迫下酸枣幼苗光合特性<sup>[15]</sup>, 对春玉米衰老的延缓<sup>[16]</sup>, 以及改善干旱胁迫下山定子<sup>[17]</sup>、早熟禾<sup>[18]</sup>叶绿素及生理状态。ALA 对菊花的光合作用和生理特性的影响及对非生物逆境的缓解效应研究很少<sup>[19]</sup>, 尚无对设施生产的光照逆境缓解效应的研究。本研究主要探讨菊花喷施外源 ALA 对光照胁迫下抗氧化酶活性的缓解效应, 以期在 ALA 在园艺产业以及在植物抗逆性上的应用提供更多的技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

本试验以切花菊品种 D3 (*Chrysanthemum × morifolium* D3) 为试验材料, 选用健壮、无病虫害、均匀一致的扦插种苗。试验于 2018 年 9 月下旬进行, 试验实施位于广州市白云区落潭镇菊花生产基地内。

### 1.2 试验方法

试验采用 3 个遮阳梯度, 分别为正常光照 100% (CK)、中度遮阳为正常光照的 50% (T1)、重度遮阳为正常光照的 25% (T2); 3 个 ALA 的喷施浓度分别为 B1 (0 mg/L)、B2 (100 mg/L)、B3 (200 mg/L), 共 9 个处理组处理试验菊花。将菊花苗定植于装有泥炭土和珍珠岩的花盆中 (泥炭土与珍珠岩的体积比为 3:1), 每盆 4 株, 每个处理组 9 盆。定植后正常光照恢复 5 d 取第 1 次样品 (d0),

收稿日期: 2020-04-24

基金项目: 广东省重点领域研发计划 (编号: 2020B020220009); 广州市民生科技攻关计划 (编号: 201903010053)。

作者简介: 何培磊 (1989—), 男, 河南信阳人, 硕士, 讲师, 研究方向为园艺花卉学。E-mail: hplstiven@163.com。

通信作者: 周厚高, 博士, 教授, 主要从事花卉学研究。E-mail: zhouhougao@163.com。

并测量 3 种抗氧化酶活性指标。在遮阳 5 d 后,进行连续 3 d 的喷施 ALA 处理,之后每 10 d 取样 1 次,共取 3 次样(分别 d10、d20、d30),并进行 3 种抗氧化酶活性指标的测定。

### 1.2.1 超氧化物歧化酶(SOD)活性测定(NBT 法)

(1) 试剂药品:0.05 mol/L 磷酸缓冲液(pH 值 7.8);130 mmol/L 甲硫氨酸(Met);750 μmol/L 氮蓝四唑(NBT);100 μmol/L EDTA-2Na;20 μmol/L 核黄素。

(2) 将 1 支暗对照管置于暗处,其余样品日光下(4 000 lx)反应 20 min(时间可自行调节,反应体系颜色变化即可)。以暗对照作空白调零,测定光对照及样品 560 nm 处吸光度。

(3) 计算 SOD 活性( $\text{U/g}$ ) =  $[(D_{\text{CK}} - D_{\text{E}}) \cdot V_{\text{T}} \cdot D] / (0.5 \cdot D_{\text{CK}} \cdot W \cdot V_{\text{R}})$ 。式中: $D_{\text{CK}}$ 为光对照管吸光度; $D_{\text{E}}$ 为样品管吸光度; $V_{\text{T}}$ 为酶提取液总体积,mL; $V_{\text{R}}$ 为测定时酶液用量,mL; $W$ 为样品鲜质量,g; $D$ 为稀释倍数。SOD 活性单位以抑制 NBT 光化还原的 50% 为 1 个酶活性单位。

### 1.2.2 过氧化物酶(POD)活性测定(愈创木酚法)

(1) 试剂药品:0.05 mol/L 磷酸缓冲液(pH 值 5.5);0.2% 愈创木酚溶液;0.3%  $\text{H}_2\text{O}_2$ 。

(2) 3 mL 反应体系:1.0 mL PBS(pH 值 5.5),0.95 mL 0.2% 愈创木酚溶液,1.0 mL 0.3%  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,1.0 mL 0.3%  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,50 μL 酶液(酶液用量可自行调节,以吸光度在 0.1 ~ 0.9 间即可),最后加入  $\text{H}_2\text{O}_2$  或愈创木酚启动反应,可使反应体系混合更均匀。

(3) 以 PBS pH 值 5.5 为对照调零,记录 470 nm 处吸光度(以每 1 min 增加 0.01 定义为 1 个酶活性单位)。

(4) POD 活性 $[\text{U}/(\text{g} \cdot \text{min})] = (\Delta D_{470 \text{ nm}} \cdot V_{\text{T}} \cdot D) / (0.01 \cdot W \cdot V_{\text{R}} \cdot t)$ 。式中: $\Delta D_{470 \text{ nm}}$ 为反应时间内吸光度的变化; $V_{\text{T}}$ 为总的酶液提取液体积,mL; $D$ 为稀释倍数; $V_{\text{R}}$ 为测定时的酶液体积,mL; $W$ 为样品鲜质量,g; $t$ 为反应时间,min。

1.2.3 过氧化氢酶(CAT)活性测定 (1) 试剂配制:0.15 mol/L 磷酸缓冲液(pH 值 7.0):取 A 母液( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ) 457.5 mL 和 B 母液( $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ ) 292.5 mL 混合后用蒸馏水定容至 1 000 mL。

(2) 反应液配制:取 200 mL PBS(0.15 mol/L, pH 值 7.0),加入 0.309 2 mL 30% 的  $\text{H}_2\text{O}$ (原液)摇匀即可。

(3) 样品测定:取 3 mL 反应液加入 0.1 mL 酶液,以 PBS 为对照调零,测定  $D_{240 \text{ nm}}$ (紫外)(测定 40 s)。

(4) 酶活性计算:以 1 min  $D$  值减少 0.01 为 1 个酶活性单位。

CAT 活性 $[\text{U}/(\text{g} \cdot \text{min})] = [\Delta D_{240 \text{ nm}} \times V_{\text{t}}] / (W \times V_{\text{s}} \times 0.01 \times t)$ 。式中: $\Delta D_{240 \text{ nm}}$ 为反应时间内吸光度的变化; $W$ 为样品鲜质量,g; $t$ 为反应时间,min; $V_{\text{t}}$ 为提取酶液总体积,mL; $V_{\text{s}}$ 为测定时取用酶液体积,mL。

## 2 结果与分析

### 2.1 ALA 对遮阳下菊花叶片 SOD 活性的影响

由表 1 可知,在正常光照条件下,ALA 的喷施对其叶片中 SOD 活性的影响不大。光照胁迫对 SOD 活性的影响是显著的,考察 d10、d20、d30 遮阳但未喷施 ALA 的处理其 SOD 活性随着遮阳的强度和遮阳的时间长度的增加逐步下降,效应达到极显著差异。在 d10 天,中度遮阳、重度遮阳处理其 SOD 活性分别降低 24.81%、39.51%,d20 分别降低 28.62%、37.29%,d30 分别降低 30.74%、40.83%。在中度遮阳处理未使用 ALA(T1)情况下,处理 10、20、30 d 其 SOD 活性分别降低 22.63%、26.27%、24.83%;在重度遮阳处理未使用 ALA(T2)情况下,处理 10、20、30 d 其 SOD 活性分别降低 39.85%、37.40%、37.93%。在同等光照胁迫强度下,SOD 活性比不遮阳的对照明显下降(表 1 中 T1B1、T2B1),但不同胁迫时间长度之间差异不显著。

对光照胁迫下的菊花喷施外源 ALA 处理,仍然导致菊花叶片 SOD 活性明显下降(表 1 中 T1B2、T1B3、T2B2、T2B3)。处理 10 d 时快速下降,中度遮阳下喷施 ALA 100、200 mg/L, SOD 活性分别下降 17.39%、9.22%,重度遮阳下分别下降 34.60%、31.11%。重度遮阳处理的 SOD 活性下降比中度遮阳处理幅度大得多,由此可见 SOD 活性下降的幅度与光照胁迫的强度密切相关。观察 d10、d20、d30,其中重度遮阳 T2 下的各时间点的酶活性降低幅度最大,比如,喷施 ALA 100 mg/L 处理 T2B2 各时间点与 d0 相比菊花酶活性分别下降 34.60%、35.14%、31.35%。由此可见,即使喷施 ALA,光照胁迫仍然能够使菊花叶片中的 SOD 活性下降,但遮阳时间长度 d10 到 d30 间对 SOD 活性的效果未表现出显著性差异,与没有 ALA 处理的 T1B1、T2B1 趋势一致。

尽管 ALA 喷施没有阻止光照胁迫导致菊花叶片 SOD 活性的下降,但是 ALA 喷施对 SOD 活性下降的缓解作用十分明显。在中度光照胁迫 T1 组,处理 10 d 时,喷施 ALA 100、200 mg/L,与没有喷施 ALA 的 T1B1 相比,SOD 活性分别增加 7.75%、21.83%,d20 分别增加 14.07%、23.40%,d30 分别增加 11.71%、21.55%。在重度光照胁迫 T2 组,处理 10 d 时,喷施 ALA 100、200 mg/L,与没有喷施 ALA 的 T2B1 的相比,SOD 的活性分别增加 7.80%、

11.46%,d20 分别增加 2.72%、9.90%,d30 分别增加 9.65%、10.46%。

喷施效果整体表现为 200 mg/L ALA > 100 mg/L ALA > 0 mg/L ALA;相比较不同的遮阳处理,ALA 的喷施对于中度遮阳下菊花叶片 SOD 活性的影响更显著,各处理组之间表现出显著性差异,且在中度遮阳下喷施 200 mg/L 的 ALA 展示的缓解效果最突出。

表 1 ALA 对光照胁迫下菊花叶片 SOD 活性的影响

处理	SOD 活性[U/(g·min)]			
	d0	d10	d20	d30
CKB1	239.96 ± 2.16bB	245.79 ± 2.25bBC	246.71 ± 3.89bBC	259.25 ± 15.03aA
CKB2	241.06 ± 3.01bB	246.57 ± 2.93bBC	253.92 ± 3.89abAB	242.4 ± 5.03bcBC
CKB3	240.26 ± 3.36bB	238.37 ± 2.40cC	246.58 ± 9.20bBC	235.17 ± 3.18cC
T1B1	238.86 ± 2.86bB	184.80 ± 2.46gF	176.10 ± 3.65hFG	179.55 ± 1.67ghF
T1B2	241.06 ± 2.22bB	199.13 ± 2.02fE	200.88 ± 4.62fE	200.57 ± 2.75fE
T1B3	248.01 ± 2.86bB	225.14 ± 2.78dD	217.31 ± 4.03eD	218.25 ± 6.30deD
T2B1	247.16 ± 3.30bB	148.67 ± 4.84kI	154.72 ± 3.65jkHI	153.41 ± 3.42jkHI
T2B2	245.04 ± 2.36bB	160.26 ± 2.04iH	158.93 ± 5.52jH	168.22 ± 4.54iGH
T2B3	240.56 ± 3.06bB	165.71 ± 2.60ijGH	170.04 ± 4.72hiG	169.46 ± 5.04hiGH

注:同列数据后不同小写字母、大写字母分别表示不同处理间在 0.05、0.01 水平差异显著。下表同。

2.2 ALA 对光照胁迫下菊花叶片 POD 活性的影响

由表 2 可知,在正常光照条件下,ALA 的喷施对菊花叶片中 POD 活性的影响不大,到后期 d30 体现了一定的促进作用。但光照胁迫对 POD 活性影响是显著的,d10、d20、d30 遮阳但未喷施 ALA (T1B1、T2B1)的处理 POD 活性随着遮阳的强度和遮阳时间长度的增加逐步下降,效应达到极显著差异。在处理 10 d,中度遮阳、重度遮阳处理 SOD 活性比 d0 分别降低 20.61%、29.20%,d20 分别降低 28.62%、38.82%,d30 分别降低 34.64%、47.71%。

对光照胁迫下的菊花喷施外源 ALA 处理,仍然导致菊花叶片 POD 活性明显下降(表 2,T1B2、T1B3、T2B2、T2B3)。处理 10 d 时快速下降,中度遮阳下喷施 ALA 100、200 mg/L 处理 SOD 活性比 d0 分别下降 16.14%、17.46%,重度遮阳下分别下降 32.23%、19.37%。重度遮阳处理的 SOD 活性下降比中度遮阳处理幅度大得多,由此可见 SOD 活性下降的幅度与光照胁迫的强度密切相关。在中度遮阳和重度遮阳处理下,随着遮阳时间的延长,POD 活性呈现出明显逐步降低,差异显著,这与遮阳对

菊花叶片 SOD 的活性影响表现不同。观察 d10、d20、d30,其中重度遮阳 T2 下的各时间点的酶活性降低幅度最大,比如,喷施 ALA 100 mg/L 处理 T2B2 各时间点与 d0 相比菊花酶活性分别下降 23.23%、32.66%、39.72%。

不同浓度 ALA 喷施对 POD 活性下降的缓解作用不一样。在中度光照胁迫 T1 组,喷施 ALA 对光照胁迫导致的 POD 活性降低的缓解作用前期不明显,d20、d30 时才有一定的促进作用。在重度遮阳 T2 组,喷施 ALA 对光照胁迫导致的 POD 活性降低的缓解作用比中度遮阳效果更明显,在处理 10 d 观察,喷施 ALA 100、200 mg/L,与没有喷施 ALA 的 T2B1 的相比,POD 的活性分别增加 9.71%、18.14%,d20 分别增加 11.37%、22.42%,d30 分别增加 16.65%、27.65%。可以发现,喷施 ALA 对光照胁迫导致 POD 活性降低的缓解作用在重度光照胁迫下,随着胁迫时间的延长,其效果更明显。

总之,喷施效果整体表现为 200 mg/L ALA > 100 mg/L ALA > 0 mg/L ALA;相比较不同的遮阳处理,ALA 的喷施对于重度遮阳下菊花叶片 POD 活性的影响更显著。

表 2 ALA 对遮阳下菊花叶片 POD 酶活性的影响

处理组	POD 活性[U/(g·min)]			
	d0	d10	d20	d30
CKB1	92.13 ± 3.83bcB	90.12 ± 3.50aA	91.43 ± 1.34bAB	89.58 ± 2.39cBC
CKB2	90.23 ± 4.03bcB	86.42 ± 3.30cC	90.85 ± 3.96bcB	93.88 ± 2.88bAB
CKB3	88.93 ± 3.86bcB	88.63 ± 3.56cBC	90.38 ± 2.89cBC	94.60 ± 1.94bAB
T1B1	92.23 ± 4.83bcB	73.22 ± 2.45dDE	65.83 ± 3.66fEF	60.28 ± 1.78gF
T1B2	90.03 ± 4.83bcB	75.50 ± 1.94dD	70.80 ± 2.84eDE	65.12 ± 2.59fEF
T1B3	89.29 ± 4.03bcB	73.70 ± 1.42dDE	69.82 ± 3.52eE	65.08 ± 0.79fEF
T2B1	87.99 ± 3.87bcB	62.30 ± 3.12fgF	53.83 ± 1.71hG	46.01 ± 4.45iH
T2B2	89.03 ± 3.83bcB	68.35 ± 1.71eE	59.95 ± 4.19gF	53.67 ± 3.24hG
T2B3	91.28 ± 4.13bcB	73.60 ± 2.30deDE	65.90 ± 2.96fEF	58.73 ± 3.72gFG

2.3 ALA 对遮阳下菊花叶片过氧化氢酶 CAT 活性的影响

由表 3 可知,在正常光照条件下,ALA 的喷施对菊花叶片中 CAT 活性的影响不大。但光照胁迫对 CAT 活性影响是显著的,d10、d20、d30 遮阳但未喷施 ALA(T1B1、T2B1)的处理 CAT 活性随着遮阳的强度和遮阳时间长度的增加逐步下降,效应达到极显著差异。在处理 10 d 时,中度遮阳、重度遮阳处理 CAT 活性比 d0 分别降低 16.05%、35.46%,d20 分别降低 22.40%、47.12%,d30 分别降低 33.33%、61.55%。

对光照胁迫下的菊花喷施外源 ALA 处理,仍然

导致菊花叶片 CAT 活性升高(表 3 中 T1B2、T1B3、T2B2、T2B3)。处理 10 d 时快速下降,中度遮阳下喷施 ALA 100、200 mg/L 处理 CAT 活性分别比不施 ALA 的处理 T1B1 升高了 8.25% 和近持平,重度遮阳下分别升高了 5.38%、22.15%。但总体来讲,CAT 活性随着光照胁迫时间延长而持续下降。

与上述 SOD、POD 酶活性变化不同的是,ALA 的喷施对缓解光照胁迫导致菊花 CAT 活性下降的作用明显较弱,只在 200 mg/L 的前期 d10 有所体现,随着光照胁迫时间延长,缓解效应逐步减弱,到 d20、d30 时期 ALA 的缓解作用已经消失。

表 3 ALA 对遮阳下菊花叶片 CAT 活性的影响

处理组	CAT 活性[U/(g·min)]			
	d0	d10	d20	d30
CKB1	71.33 ± 3.21aA	69.80 ± 3.34aA	69.55 ± 3.12aA	70.13 ± 2.18aA
CKB2	70.39 ± 4.10aA	69.00 ± 2.74aA	72.97 ± 3.11aA	70.91 ± 2.05aA
CKB3	69.63 ± 3.98aA	68.17 ± 4.52aA	70.67 ± 2.19aA	73.03 ± 3.40aAB
T1B1	69.33 ± 3.51aA	58.20 ± 2.30cBC	53.80 ± 2.70dCD	46.22 ± 5.39eD
T1B2	72.53 ± 3.19aA	63.00 ± 3.21bB	56.67 ± 3.28cdC	47.55 ± 4.20eD
T1B3	70.35 ± 2.99aA	58.00 ± 4.50cdBC	55.92 ± 3.06cdC	46.90 ± 2.60eD
T2B1	72.05 ± 3.41aA	46.50 ± 2.23eD	38.10 ± 2.28fE	27.70 ± 2.30gF
T2B2	69.53 ± 3.94aA	49.00 ± 1.85eD	36.45 ± 2.74fE	29.00 ± 1.96gF
T2B3	71.89 ± 3.31aA	56.80 ± 1.80cdC	39.00 ± 2.80fE	27.00 ± 1.80gF

3 结果与讨论

外源 ALA 的喷施能够通过影响植物的光合作用,从而提高植物的营养生长能力,提高产量、改善品质,已经在很多的试验中获得证实,如显著提高黄瓜幼苗的全株干质量、壮苗指数和根系活力<sup>[6,14]</sup>。

但是对于在非生物逆境条件下,外源 ALA 对逆境效应缓解作用的探讨还不多,探讨了 ALA 缓解喜树幼苗<sup>[12]</sup>、酸枣幼苗<sup>[15]</sup>盐害的生理机制,探讨了 ALA 缓解干旱对早熟禾<sup>[18]</sup>、山定子<sup>[17]</sup>以及低温对玉米幼苗<sup>[16]</sup>胁迫的生理机制,对菊花相关研究更少,仅见探讨了 ALA 缓解低温胁迫的光合作用和生理

影响<sup>[19]</sup>。

抗氧化酶系统是逆境生理研究的重要指标,不同的非生物逆境研究都涉及到 SOD、POD 和 CAT 等活性的研究<sup>[20]</sup>。本研究发现,ALA 缓解菊花光照胁迫的效应中,SOD、POD 和 CAT 活性的反应模式是不一样的。在光照胁迫下,ALA 都能使 SOD、POD 下降中的活性得到一定程度的回升反应,这一结果与花椰菜幼苗的研究<sup>[13]</sup>一致,该研究表明 150 mmol/L NaCl 胁迫下,喷施 10 mg/L ALA 能够显著提高 SOD、POD 活性。本研究发现,光照胁迫下,在时间维度 SOD 活性下降幅度较小,也就是说,处理 10~30 d SOD 活性下降较少,而 POD 活性在时间维度的稳定性稍差,随着胁迫时间持续,POD 活性持续下降。

在酸枣种子萌发的研究发现,ALA 的喷施能够减缓盐水对酸枣种子的胁迫作用,明显提高 CAT、SOD、POD 活性和 MDA 含量<sup>[15]</sup>。而本研究发现,ALA 对光照胁迫下缓解 CAT 活性下降有一定效果,但不如在酸枣幼苗中的作用显著,且效应的持续性差。

本研究从 ALA 浓度和持续时间 2 个维度观察了在光照胁迫下,ALA 对菊花叶片抗氧化酶活性的缓解效应,发现了 CAT、SOD、POD 不一样的反应模式,特别是在时间维度 ALA 的效果持续性方面,3 种酶的反应不同,而这方面的研究目前还不多。今后将在 ALA 浓度梯度和时间长度方面进一步拓展,在农艺性状到分子机制不同层面加强研究,为生产应用提供更多的资料。

#### 参考文献:

- [1] Castelfranco P A, Beale S I. Chlorophyll biosynthesis: recent advances and areas of current interest[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1983, 34(1): 241–276.
- [2] Monteiro H P, Abdalla D S P, Augusto O, et al. Free radical generation during  $\delta$ -aminolevulinic acid autoxidation: induction by hemoglobin and connections with porphyriopathies[J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 1989, 271(1): 206–216.
- [3] Chakraborty N, Tripathy B C. Involvement of singlet oxygen in  $\delta$ -aminolevulinic acid-induced photodynamic damage of cucumber

- (*Cucumis sativus* L.) chloroplasts[J]. Plant Physiology, 1992, 98(1): 7–11.
- [4] Nishihara E, Kondo K, Parvez M M, et al. Role of  $\delta$ -aminolevulinic acid (ALA) on active oxygen-scavenging system in NaCl-treated spinach (*Spinacia oleracea*) [J]. Plant Physiology, 2003, 160(9): 1085–1091.
- [5] 王俊卿, 张肇铭.  $\delta$ -氨基乙酰丙酸的光动力应用研究进展[J]. 微生物学通报, 2004, 31(3): 136–140.
- [6] 徐刚, 刘涛, 高文瑞, 等.  $\delta$ -氨基乙酰丙酸对蔬菜生理作用的研究进展[J]. 金陵科技学院学报, 2010, 26(4): 52–57.
- [7] 孙建伟. 淹水对玉米细胞抗氧化酶系统的影响[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(1): 44–45, 48.
- [8] 陈天, 刘云根, 王妍, 等. 外源磷对砷胁迫下挺水植物抗氧化酶系统的影响[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(5): 1040–1046.
- [9] 蔡天革, 张慧娇, 陈丽娜, 等. 施硒对荞麦抗氧化酶系统和产量影响的研究[J]. 辽宁大学学报(自然科学版), 2019, 46(3): 202–207.
- [10] 高兴国, 王磊, 杨顺强, 等. 干旱胁迫对光叶珙桐幼苗抗氧化系统的影响[J]. 西部林业科学, 2019(1): 23–28.
- [11] 陈海霞, 李志奇, 彭尽晖, 等. 铝胁迫对八仙花抗氧化酶系统的影响[J]. 湖南生态科学学报, 2019, 6(4): 7–13.
- [12] 孟长军, 杜喜春, 张旸.  $\delta$ -氨基乙酰丙酸对喜树幼苗盐害缓解的生理机制研究[J]. 热带亚热带植物学报, 2019, 27(2): 164–170.
- [13] 范夕玲, 杨亚苓, 任健, 等. 外源  $\delta$ -氨基乙酰丙酸对盐胁迫下花椰菜幼苗生理特性的影响[J]. 天津农业科学, 2019, 25(12): 1–4.
- [14] 武玥. 外源  $\delta$ -氨基乙酰丙酸(ALA)缓解黄瓜幼苗盐胁迫的效果及机理研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
- [15] 李芳芳, 赵宝龙, 李汉钊, 等.  $\delta$ -氨基乙酰丙酸浸种对 NaCl 胁迫下酸枣种子萌发及芽苗生理特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(17): 126–129.
- [16] 王燚.  $\delta$ -氨基乙酰丙酸(ALA)缓解玉米早春低温胁迫生理机制[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
- [17] 王颖, 孔德浩, 陈佰鸿, 等. 外源 ALA 对干旱胁迫下山定子叶片叶绿素荧光特性及抗性生理指标的影响[J]. 西北植物学报, 2018, 38(5): 902–911.
- [18] 牛奎举. 外源  $\delta$ -氨基乙酰丙酸对干旱胁迫下草地早熟禾光合作用的调控机制[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
- [19] 张严玮, 房伟民, 黄素华, 等. 外源 ALA 对低温胁迫下切花菊光合作用及生理特性的影响[J]. 南京农业大学学报, 2014, 37(1): 47–52.
- [20] 徐文君, 程江峰. 土壤邻苯二甲酸二丁酯对白菜生长和抗氧化酶系统的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(7): 142–147.