

张晓晓,陈双双,郑 婷,等. 铝胁迫对虎舌红叶片活性氧代谢及光合光响应特性的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(1):72-75.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.01.019

铝胁迫对虎舌红叶片活性氧代谢 及光合光响应特性的影响

张晓晓,陈双双,郑 婷,郇 枫,刘 鹏

(浙江师范大学化学与生命科学学院/浙江省野生动物生物技术与保护利用重点实验室,浙江金华 321004)

摘要:通过溶液培养法探究铝胁迫对虎舌红生理响应的影响。以盆栽 2 年生虎舌红扦插苗为试验材料,用含 AlCl_3 的 Hoagland's 营养液处理虎舌红幼苗,分别以 7、14、21 d 为不同周期,浓度梯度设置为 0 (CK)、200 $\mu\text{mol/L}$ (T_1)、500 $\mu\text{mol/L}$ (T_2)、1 000 $\mu\text{mol/L}$ (T_3) 和 2 000 $\mu\text{mol/L}$ (T_4)。结果表明,随着胁迫程度的加剧,虎舌红叶片中丙二醛 (MDA) 含量逐渐升高。轻度铝胁迫下虎舌红叶片的超氧化物歧化酶 (SOD) 和过氧化物酶 (POD) 无显著变化;中度铝胁迫处理下 SOD、POD 活性明显上升,CAT 活性被抑制;高度胁迫时 CAT 活性明显被抑制。前 2 个周期低铝处理 (T_1 、 T_2) 下虎舌红叶片通过部分荧光参数 F_0 、 $Yield$ 、 q_N 以及叶绿素含量的增加来抵抗铝毒害,而在高铝处理下 3 个叶绿素荧光参数和叶绿素含量一定程度被抑制,表明虎舌红叶片光合效率下降。由此可知,虎舌红可以通过增加抗氧化酶的活性、相关荧光参数的大小以及叶绿素含量来增加其耐铝性。虎舌红具有较强的抗铝毒害能力,且在一定时间范围内可以有效抵御铝所造成的伤害。

关键词:铝胁迫;虎舌红;活性氧;叶绿素荧光;抗逆性

中图分类号: Q945.78 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)01-0072-04

铝是土壤中最主要的金属元素,通常以难溶性铝硅酸盐或氧化铝等稳定的络合物形式存在,对植物无毒害作用,但当土壤 pH 值 <5 时,难溶性铝会转变为可溶性铝离子,并随着环境污染的加剧呈指数型增长。近几年南方红壤区土壤酸化面积加大,酸化程度日趋严重,造成铝毒害现象加重,导致该区耕地的生产力和质量都逐步下降^[1]。有研究表明,当土壤交换性铝含量过多时,植物会表现出明显的铝毒害症状,主要为根尖结构被破坏以及根系的伸长和吸收功能被抑制,从而影响作物的生长和产量。

虎舌红 (*Ardisia mamillata* Hance) 属紫金牛科 (Myrsinaceae) 常绿小灌木,具有匍匐的木质根状茎,叶片红润椭圆形,其红紫色茸毛可折射出七彩佛光,故又称佛光红^[2];株形优美,叶果皆可以观赏,果实成熟期较长,周年不落,老果新果同挂一株,色泽红而发亮,甚为美观。适应性强的虎舌红既可在各地居室中盆栽,也可在园林中作耐阴地被植物,且易栽培管理。近年来,国内外对虎舌红的研究主要针对化学成分的种类^[3]、功效^[4-5]及繁殖技术^[6]等方面,而对虎舌红逆境胁迫下的探究较少,仅少数学者探索紫金牛科紫金牛 [*Ardisia japonica* (Thunb) Blume]^[7]和堇叶紫金牛 (*Ardisia violacea*)^[8]对于干旱胁迫的生理响应,而对价值高的虎舌红在

红壤环境下的抗铝性研究尚未见报道。有研究显示,一定浓度 Al^{3+} 处理可抑制大豆 [*Glycine max* (Linn.) Merr.]^[9-10]根系的生长,导致其脂质过氧化^[11]等;此外,较高浓度的铝胁迫也可导致水稻 (*Oryza sativa* L.) 出现枯萎黄化等明显受伤症状^[12]。因此,笔者以虎舌红为试验材料,通过溶液培养法研究铝胁迫下其叶片活性氧的代谢情况和光合光响应特性,探讨其对铝毒害响应的生理机制,揭示其在铝胁迫下的抗逆性大小,为紫金牛科植物虎舌红的抗铝性和缓解土壤铝毒害的研究提供理论支持。

1 材料和方法

1.1 试验材料 with 处理

试验材料为生长一致的盆栽虎舌红 (二年生扦插苗),野生扦插苗采于江西省大余县吉村镇山区。盆栽用塑料花盆上、下口的平均直径分别为 28、15 cm,高度为 20 cm,每盆定植苗木 1 株。1 盆土壤质量约 3 kg,盆底放置 2 层塑料纸。在光照培养室内土培适应 1 个月后,先将其转入 Hoagland's 半完全营养液中适应 15 d,然后于完全营养液中进行培育和胁迫处理。试验设计 5 个铝离子 (Al^{3+}) 浓度处理,分别为 0 $\mu\text{mol/L}$ (CK)、200 $\mu\text{mol/L}$ (T_1)、500 $\mu\text{mol/L}$ (T_2)、1 000 $\mu\text{mol/L}$ (T_3) 和 2 000 $\mu\text{mol/L}$ (T_4),各处理设 3 个重复。处理期间,每 3 d 更换 1 次营养液,在胁迫处理 7、14、21 d 08:00—12:00 取顶端的第 3~4 张成熟叶片,测定其相关生理指标。

1.2 测定方法

采用愈创木酚法^[13]测定叶片过氧化物酶 (POD) 活性,氮蓝四唑 (NBT) 法^[12]测定叶片超氧化物歧化酶 (SOD) 活性,紫外吸收法^[13]测定叶片过氧化氢酶 (CAT) 活性,硫代巴比妥酸

收稿日期:2016-07-17

基金项目:国家自然科学基金 (编号:41571049、41461010);2016 年新苗人才计划 (编号:2016R81)。

作者简介:张晓晓 (1994—),女,浙江宁波人,硕士研究生,主要从事逆境植物生理研究。E-mail:1451112798@qq.com。

通信作者:刘 鹏,博士,教授,研究方向为植物生理生态、植物逆境生理、环境污染与保护。E-mail:sky79@zjnu.cn。

法^[13]测定丙二醛(MDA)含量,PAM-210 叶绿素测定仪测定叶绿素荧光参数^[13],丙酮研磨法^[13]测定叶绿素 a、b 含量。

1.3 数据处理

计算平均值和标准误差。用 SPSS 18.0 统计软件分析,以单因素方差分析法和 Duncan's 法进行显著性差异分析,用 Excel 2013、Origin 9.0 软件制图。

2 结果与分析

2.1 铝胁迫对虎舌红叶片 SOD、POD、CAT 活性的影响

2.1.1 铝胁迫对虎舌红叶片 SOD 的影响 超氧化物歧化酶(SOD)广泛存在于生物体内,专一性地清除生物代谢过程中产生的有毒害作用的超氧阴离子自由基。从图 1 可以看出,Al³⁺胁迫期间,随胁迫浓度的增大,虎舌红叶片的 SOD 活性先升高后降低,其中 T₂ 处理时达到最大值。低浓度 T₂ 处理组 SOD 活性与 CK 差异显著,且胁迫 14、21 d 时任一处理组 SOD 活性均高于 CK,说明在 Al³⁺ 处理下虎舌红叶片通过迅速增加 SOD 活性来保护细胞,在防止胁迫条件下活性氧含量增加导致的损害中起着重要作用。同时,Al³⁺ 处理 7、14、21 d 时,低浓度 T₁ 下 SOD 活性增幅分别为 7.34%、17.16%、32.59%,高浓度 T₄ 下增幅分别为 3.14%、9.78%、9.43%,可见低浓度对 SOD 活性的诱导作用强于高浓度。

在胁迫 7、14、21 d 时,处理组虎舌红叶片 SOD 活性相比 CK 的最大增幅依次为 37.07%、57.11%、74.43%,表明在胁迫初期,虎舌红叶片的 SOD 活性被小幅度诱导,随着胁迫时间的延长其被诱导的幅度逐渐增加,说明胁迫后期虎舌红表现出了对 Al³⁺ 胁迫的适应性。

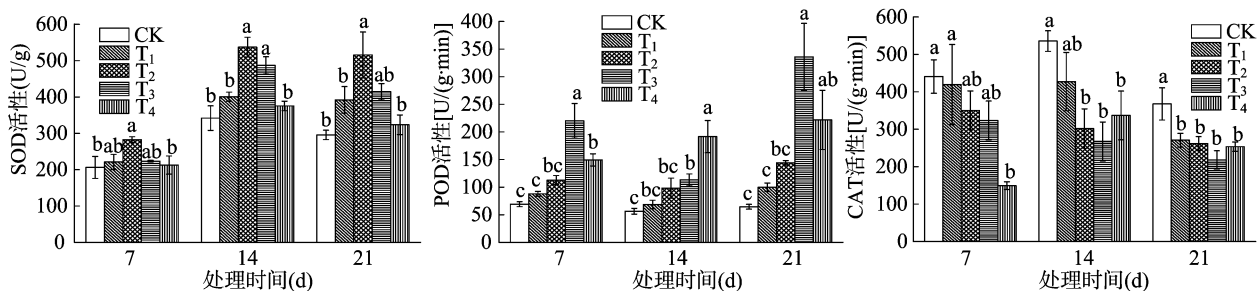
2.1.2 铝胁迫对虎舌红叶片 POD 的影响 过氧化物酶(POD)是一类性质比较稳定的氧化还原酶类,可催化由过氧

化氢(H₂O₂)参与的各种还原剂的氧化反应,在植物对环境的应答方面起着重要的调节和保护作用。由图 1 可知,除 T₄ 处理外,虎舌红叶片的 POD 活性与胁迫浓度呈正相关关系,在低浓度 T₁ 处理下,POD 活性保持在低水平状态,最大增幅为 54.83%;而在中浓度 T₃ 与高浓度 T₄ 处理下,处理组的 POD 活性与 CK 存在显著差异,最小增幅为 100.85%,表明较高的 Al³⁺ 浓度更能激发虎舌红叶片 POD 活性的上升以维持虎舌红叶片活性氧代谢的平衡。

铝胁迫 7、14、21 d 时,虎舌红叶片的 POD 活性分别比对照上升了 27.37%~218.71%、21.81%~239.87%、54.83%~420.48%,说明虎舌红叶片的 POD 活性与胁迫时间整体上呈正相关关系,与胁迫浓度的影响情况基本一致。

2.1.3 铝胁迫对虎舌红叶片 CAT 的影响 植物代谢产物 H₂O₂ 对植物细胞具有损伤作用,而过氧化氢酶(CAT)是清除 H₂O₂ 的主要酶类,可保护植物细胞。目前研究已证实增强植物抗逆性的途径之一是提高植物体内抗氧化酶类活性及增强抗氧化代谢的水平。图 1 表明,在铝胁迫条件下,处理组虎舌红叶片 CAT 活性在 3 个处理期(7、14、21 d)均低于 CK,分别为 CK 的 33.88%~95.14%、49.91%~79.78%、59.27%~73.64%,且同一时期内随胁迫浓度的增大其活性总体呈降低的趋势。同时还可以看出,T₁、T₂、T₃ 处理下虎舌红叶片 CAT 活性的最低值均出现在胁迫 21 d,而 T₄ 组 CAT 活性最低值在胁迫 7 d,表明中低浓度(T₁、T₂、T₃)处理与高浓度(T₄)处理下的虎舌红对胁迫时间的反应存在一定差异。

SOD 把超氧化物歧化为 H₂O₂ 后,在一定强度的环境胁迫下 CAT 和 POD 有互补的作用,胁迫期间 POD 活性变化趋势与 CAT 相反,因此本试验中虎舌红叶片 CAT 活性的降低可能有利于 POD 活性的增加与其功能的发挥。



柱上不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同

图1 铝胁迫对虎舌红叶片 SOD、POD、CAT 活性的影响

2.2 铝胁迫对虎舌红叶片丙二醛含量的影响

植物器官在逆境条件下,通常会发生膜脂过氧化,而 MDA 可反映细胞膜脂过氧化的程度以及植物对逆境条件反应的强弱。由图 2 可知,铝胁迫条件下,虎舌红叶片内的 MDA 含量增加,且具有浓度效应,即随胁迫浓度的增加,虎舌红叶片内的 MDA 含量增加得越明显,3 个处理期的平均胁迫浓度从 T₁ 增加到 T₄ 时,MDA 含量从对照的 112.10% 上升为对照的 216.86%;且当浓度为 T₂ 时 MDA 含量开始与对照组产生明显差异,不同时期(处理 14、21 d)T₂ 组的 MDA 含量分别为对照的 143.44%、153.44%,反映出胁迫浓度越大,虎舌红叶片的膜脂过氧化越严重。当处理时间由 7 d 延长到 21 d 时,MDA 含量最大增幅由 132.08% 降到了 95.70%,表明胁迫

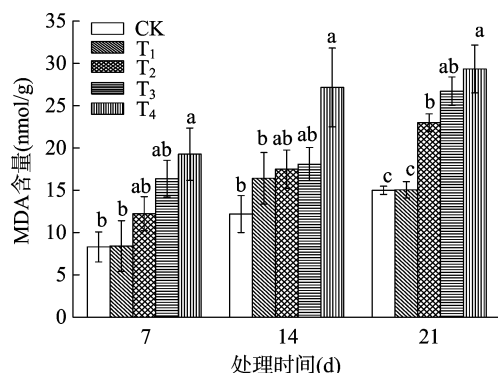


图2 铝胁迫对虎舌红叶片 MDA 含量的影响

迫时间对叶片 MDA 含量的影响与浓度不一致。

2.3 铝胁迫对虎舌红叶片叶绿素荧光的影响

叶绿素荧光技术是快速检测植物光合机构损伤程度的灵敏探针,可反映植物光合生理特性与逆境胁迫的关系。由表 1 可知,胁迫 7、14 d 时, F_o 均在 T_2 处理时达到最大值,较对照分别增加 54.83%、57.00%,而当胁迫 21 d 时, T_3 浓度时 F_o 被显著抑制 27.61%,这说明虎舌红叶片在较高铝浓度处理下光合效率会受到轻微损害。 T_2 、 T_3 、 T_4 处理组的 F_m 在胁迫 7 d 时有显著变化,而当处理 14、21 d 时,低铝处理下 F_m 明显增加,高铝浓度下表现出被抑制。 ETR 为电子传递速率,处

理 7、14 d 时,ETR 均在 T_2 被显著抑制,最高被抑制了 43.95%,而至胁迫 21 d 时各浓度处理下变化较小。高浓度下 Yield 在前 2 个处理时间均无显著变化,低铝浓度对其有微小促进作用。光化学猝灭系数(q_P)反映光抑制(Photosystem II)天线色素吸收的光能用于光化学反应的份额。胁迫 7 d 时,在 T_1 处理下增大 14.84%,而在 T_2 处理下减小,胁迫 21 d 时,高浓度有显著变化。 q_N 为非光化学猝灭系数,在胁迫第 1 周期内整体上随铝浓度的增加呈先增大后减小再增大的趋势,表明低铝浓度下虎舌红叶片可通过增加 q_N 来缓解逆境胁迫带来的伤害。

表 1 铝胁迫对虎舌红叶片叶绿素荧光参数的影响

胁迫时间 (d)	铝浓度 ($\mu\text{mol/L}$)	叶绿素荧光参数值					
		F_o	F_m	ETR	Yield	q_P	q_N
7	0	0.093 ± 0.007b	0.365 ± 0.027b	14.400 ± 1.400a	0.090 ± 0.008a	0.128 ± 0.011ab	0.263 ± 0.038c
	200	0.083 ± 0.003b	0.350 ± 0.006b	14.367 ± 0.967a	0.102 ± 0.007a	0.147 ± 0.008a	0.378 ± 0.005b
	500	0.144 ± 0.021a	0.572 ± 0.056a	8.933 ± 1.618b	0.056 ± 0.010b	0.081 ± 0.013c	0.395 ± 0.014b
	1 000	0.114 ± 0.003ab	0.475 ± 0.023a	11.400 ± 0.252ab	0.071 ± 0.002ab	0.101 ± 0.003bc	0.344 ± 0.004b
	2 000	0.111 ± 0.004b	0.471 ± 0.032a	13.333 ± 1.506a	0.088 ± 0.014a	0.132 ± 0.023ab	0.490 ± 0.028a
14	0	0.100 ± 0.022bc	0.412 ± 0.101bc	14.333 ± 3.037abc	0.089 ± 0.019ab	0.129 ± 0.028ab	0.349 ± 0.014c
	200	0.123 ± 0.010ab	0.554 ± 0.041ab	10.833 ± 0.578bc	0.068 ± 0.004ab	0.097 ± 0.006b	0.419 ± 0.028b
	500	0.157 ± 0.003a	0.647 ± 0.020a	8.033 ± 0.167c	0.050 ± 0.001b	0.077 ± 0.003b	0.515 ± 0.011a
	1 000	0.073 ± 0.007c	0.320 ± 0.015c	17.300 ± 1.345a	0.108 ± 0.009a	0.151 ± 0.009a	0.360 ± 0.011bc
	2 000	0.085 ± 0.020bc	0.364 ± 0.067bc	14.867 ± 2.636ab	0.093 ± 0.017a	0.131 ± 0.020ab	0.347 ± 0.020bc
21	0	0.134 ± 0.008a	0.587 ± 0.006a	10.900 ± 0.500b	0.068 ± 0.003b	0.096 ± 0.002b	0.356 ± 0.012b
	200	0.131 ± 0.010ab	0.568 ± 0.018a	13.867 ± 0.833ab	0.087 ± 0.005ab	0.126 ± 0.006ab	0.432 ± 0.012a
	500	0.118 ± 0.005abc	0.525 ± 0.005ab	14.300 ± 1.000ab	0.089 ± 0.006ab	0.128 ± 0.008ab	0.414 ± 0.026ab
	1 000	0.097 ± 0.006c	0.484 ± 0.027b	17.067 ± 1.189a	0.107 ± 0.007a	0.146 ± 0.010a	0.396 ± 0.037ab
	2 000	0.107 ± 0.010bc	0.492 ± 0.026b	15.267 ± 2.131a	0.095 ± 0.013a	0.131 ± 0.017a	0.356 ± 0.010b

注: F_o 表示最小荧光; F_m 表示最大荧光产量; ETR 表示表观电子传递速率; $Yield$ 表示荧光量子效率; q_P 表示光化学淬灭系数; q_N 表示非光化学淬灭参数;同栏同列数据后的不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

2.3 铝胁迫对虎舌红叶片叶绿素 a、b 含量的影响

叶绿素广泛存在于绿色植物体内,具有着色和营养双重功效,是植物光合色素中最重要的一类色素,而其中以叶绿素 a、叶绿素 b 尤为重要。在铝胁迫下,虎舌红叶片叶绿素含量不仅直接关系着虎舌红光合同化过程,而且是衡量其抗逆性的重要指标之一。从图 3 可以看出, Al^{3+} 处理下虎舌红叶片的叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量以及叶绿素 a + b 含量随胁迫浓度的增加均呈先升高后下降的变化趋势,在 T_2 处理下达到最大值。同时,在 T_2 处理下叶绿素 a 的含量在胁迫 7、14、21 d 后的增幅分别为 120.03%、48.81%、54.32%,叶绿素 b

含量的增幅分别为 95.90%、50.91%、49.65%,叶绿素 a + b 含量的增幅分别为 114.58%、49.41%、52.87%,表明低浓度且短时间的铝胁迫有利于虎舌红叶片叶绿素的积累。

虎舌红叶片叶绿素 b 含量整体上随着胁迫时间的延长而增加,而叶绿素 a 与叶绿素 a + b 含量整体上随着胁迫时间的延长而下降,说明轻度胁迫能诱导虎舌红叶片叶绿素含量的上升,且最适诱导浓度为 500 $\mu\text{mol/L}$,而重度胁迫则对叶绿素含量产生抑制作用,可反映出重度胁迫下虎舌红叶片活性氧代谢减慢。

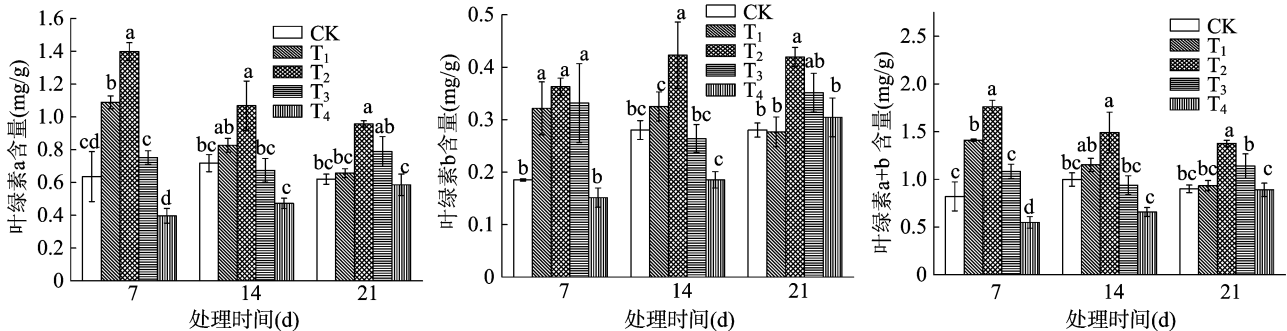


图3 铝胁迫对虎舌红叶片叶绿素 a、叶绿素 b 以及叶绿素 a+b 含量的影响

3 讨论与结论

铝是地壳中最丰富的金属元素,当其表现为细胞毒性形式时,可通过作用在根尖区而导致植物生长抑制。铝的毒性作用机制可能是因为细胞骨架失真、胼胝质堆积对质膜表面电荷的干扰,从而引起膜的脂质过氧化^[14]。本试验结果表明,在铝胁迫下虎舌红会发生氧化应激、膜脂过氧化以及光合速率下降等现象,但抗铝响应程度存在一定的差异。本试验结果显示,与 CK 相比,中度铝胁迫能诱导虎舌红 SOD、POD 活性上升,但高浓度铝胁迫下仅 CAT 活性被抑制,这可能是由于铝胁迫浓度超过其耐受度^[15]所致。Chen 等指出,金属离子通过损害 SOD 等酶引起氧化胁迫^[16],符合高铝胁迫下抗氧化酶活性被显著抑制的现象;Brej 报道显示,冰草 [*Agropyron cristatum* (L.) Gaertn. (Gramineae.)] 叶片中的 CAT 活性在重金属胁迫下显著上升^[17],而本试验说明虎舌红 CAT 活性在不同胁迫浓度下均被抑制,这表明 CAT 可能不是其抗氧化应激反应中的关键酶。逆境下植物体内 MDA 含量会增加,含量越高表示受伤害的程度越大。本试验结果发现,高浓度的铝使虎舌红叶片 MDA 含量升高,说明铝胁迫作用可导致虎舌红叶片中活性氧等的大量产生,引发膜脂过氧化,这与 Yilmaz 等金属胁迫下的研究结果^[18-21]一致。

光合作用是一个非常复杂的生理过程,在特定条件下所测得的光合能力可作为评估植物自身状态的重要生理指标,而叶片的光合速率与植物的自身因素(叶绿素含量、叶片厚度等)密切相关,同时又受到光照强度、气温、空气相对湿度等外界因素的限制,因此逆境铝胁迫对光合作用的影响过程是极其复杂的。本试验对虎舌红叶片的叶绿素含量以及叶绿素荧光参数进行测定,从结果来看,一方面可知高铝浓度会抑制虎舌红的光合作用,但随胁迫时间的延长效果减弱;而另一方面说明,前 2 个周期低铝浓度(T_2 、 T_3)下虎舌红可通过部分荧光参数 F_0 、 $Yield$ 、 q_N 以及叶绿素含量的增加缓解铝毒作用,这与马新明等轻度干旱胁迫下叶片光系统 II 活性和光化学最大效率的增加结果^[21]相一致。光合色素中的叶绿素在光合作用过程中起着接收和转换能量的作用,能将光能转换成化学能,其中叶绿素 a 分子执行能量转化,叶绿素 b 是光色素蛋白复合体的重要组成部分,其作用主要在于捕获和传递光能,因此推测铝胁迫可能通过抑制或减弱叶绿素对光能的吸收和转化来实现毒害作用,而植物可通过增加叶绿素含量来抵消低铝胁迫对自身造成的损害,却无法抵抗高铝胁迫带来的伤害。

综上所述,铝胁迫引发的细胞内活性氧等的过度积累及其所导致的膜脂过氧化对叶绿素 a、叶绿素 b 合成的影响可能是胁迫伤害虎舌红幼苗的主要原因,虽然较高浓度的 Al^{3+} 对虎舌红造成某种程度的损害,但低浓度的 Al^{3+} 对虎舌红的生长没有损伤,相反有适当的促进作用,因此虎舌红具有较强的抗铝性,并且可通过 SOD 活性、POD 活性、叶绿素含量以及 F_0 、 $Yield$ 、 q_N 的增加来抵御铝毒害,从而使自身得以生存和生长,但虎舌红只能在一定浓度范围内抵御铝胁迫,因此对高浓度铝胁迫要提前做好预防措施。

参考文献:

[1] 吴道铭,傅友强,于智卫,等. 我国南方红壤酸化和铝毒现状及防

- 治[J]. 土壤,2013,45(4):577-584.
- [2] 杨妙贤. 虎舌红野生资源的开发利用[J]. 中国野生植物资源, 2004,23(6):27,32.
- [3] Huang J, Ogihara Y, Zhang H, et al. Triterpenoid saponins from *Ardisia mamillata*[J]. Phytochemistry,2000,54(8):817-822.
- [4] 杨海宽,江香梅,赵玲华,等. 虎舌红不同部位挥发性成分差异研究[J]. 江西农业大学学报,2013,35(5):993-998.
- [5] 刘经亮,凌育超,王如意,等. 虎舌红中黄酮类化学成分研究[J]. 中草药,2015,46(6):808-811.
- [6] 熊兴隆. 虎舌红人工繁育栽培技术总结[J]. 农业与技术,2013(2):120-121.
- [7] 张建新,葛淑芳,吴玉环,等. 干旱胁迫对紫金牛叶片碳氮代谢的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(2):278-282.
- [8] 代英超,徐奎源,马凯,等. 珍稀濒危植物茎叶紫金牛对持续干旱的生理响应[J]. 生态学报,2015,35(9):2954-2959.
- [9] 胡蕾,应小芳,刘鹏,等. 铝毒对大豆农艺性状的影响[J]. 浙江农业科学,2004(3):148-150.
- [10] Lan T, You J F, Kong L N, et al. The interaction of salicylic acid and Ca^{2+} alleviates aluminum toxicity in soybean (*Glycine max* L.)[J]. Plant Physiology and Biochemistry,2016,98:146-154.
- [11] Mendoza-Soto A B, Naya L, Leija A, et al. Responses of symbiotic nitrogen-fixing common bean to aluminum toxicity and delineation of nodule responsive microRNAs[J]. Frontiers in Plant Science, 2015,6:587.
- [12] 陈荣府,沈仁芳. 水稻(*Oryza sativa* L.)铝毒害与耐性机制及铝毒害的缓解作用[J]. 土壤,2004,36(5):481-491.
- [13] 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,2000:10-20.
- [14] Arunakumara K K I U, Walpola B C, Yoon M H. Aluminum toxicity and tolerance mechanism in cereals and legumes—A review[J]. Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry, 2013,56(1):1-9.
- [15] Gill K K, Sandhu H S, Kaur R. Evaluation of lipid peroxidation and antioxidant status on fenvalerate, nitrate and their co-exposure in *Bubalus bubalis*[J]. Pesticide Biochemistry and Physiology,2015, 123:19-23.
- [16] Chen M, Zhang L L, Li J, et al. Bioaccumulation and tolerance characteristics of a submerged plant (*Ceratophyllum demersum* L.) exposed to toxic metal lead[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety,2015,122:313-321.
- [17] Brej T. Heavy metal tolerance in *Agropyron repens* (L.) P. Bauv. populations from the Legnica copper smelter area, Lower Silesia[J]. Acta Societatis Botanicorum Poloniae,1998,67:325-333.
- [18] Yilmaz D D, Parlak K U. Changes in proline accumulation and antioxidative enzyme activities in *Groenlandia densa* under cadmium stress[J]. Ecological Indicators,2011,11(2):417-423.
- [19] Daud M K, Ali S, Variath M T, et al. Differential physiological, ultramorphological and metabolic responses of cotton cultivars under cadmium stress[J]. Chemosphere,2013,93(10):2593-2602.
- [20] Hawrylak-Nowak B, Dresler S, Wójcik M. Selenium affects physiological parameters and phytochelatin accumulation in cucumber (*Cucumis sativus* L.) plants grown under cadmium exposure[J]. Scientia Horticulturae,2014,172:10-18.
- [21] 马新明,熊淑萍,李琳. 土壤水分对不同专用小麦后期光合特性及产量的影响[J]. 应用生态学报,2005,16(1):83-87.