

外源NO对铝胁迫下西瓜幼苗生长及生理特性的影响

肖家昶, 郑开敏, 马俊英, 郑阳霞

引用本文:

肖家昶, 郑开敏, 马俊英, 等. 外源NO对铝胁迫下西瓜幼苗生长及生理特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(8): 1650-1658.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0145>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

氧化石墨烯对玉米幼苗生长及生理特征的影响

赵琳, 宋瑞瑞, 吴琦, 吴希, 云振宇

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1167-1173 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1104>

外源一氧化氮对镉胁迫下紫花苜蓿幼苗活性氧代谢和镉积累的影响

陈银萍, 蘧苗苗, 苏向楠, NGABIRE Maurice, 杨志娟, 杨述文, 摆玉林

农业环境科学学报. 2015(12): 2261-2271 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.12.003>

纳米硫对铅胁迫下油菜幼苗生长和铅积累的影响

原海燕, 刘清泉, 张永侠, 符佳豪, 王银杰, 孙玉明, 佟海英

农业环境科学学报. 2021, 40(3): 517-524 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0798>

铀对蚕豆幼苗光合特性和呼吸代谢的毒害机理

刘泽伟, 赖金龙, 李俊柯, 丁峰, 张宇, 罗学刚

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 1916-1924 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0390>

硅酸盐提高番茄抗盐性的效应与生理机制

朱永兴, 李换丽, 胡彦宏, 张田田, 韩卫华, 宫海军

农业环境科学学报. 2015(2): 213-220 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.02.002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

肖家昶, 郑开敏, 马俊英, 等. 外源 NO 对铝胁迫下西瓜幼苗生长及生理特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(8): 1650–1658.

XIAO J C, ZHENG K M, MA J Y, et al. Effects of exogenous NO on growth and physiological characteristics of watermelon seedlings under aluminum stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(8): 1650–1658.



开放科学 OSID

外源 NO 对铝胁迫下西瓜幼苗生长及生理特性的影响

肖家昶, 郑开敏, 马俊英, 郑阳霞*

(四川农业大学园艺学院, 成都 611130)

摘要:为研究外源 NO 对西瓜铝胁迫的缓解作用,以高浓度的铝胁迫($1\ 200\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)下西瓜品种早佳 84-24 为试验材料,以外源硝普钠(SNP)为 NO 供体,研究不同浓度 SNP($50, 100, 200, 500\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)对铝胁迫下西瓜幼苗的生长及生理特性影响。结果表明,铝胁迫下西瓜幼苗的生长受到了抑制,西瓜叶片细胞膜透性显著增大,膜脂过氧化的产物丙二醛(MDA)增加了 14.18%,超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)含量均显著降低,可溶性糖、脯氨酸含量显著上升。铝胁迫导致叶片中叶绿素含量显著降低,并影响西瓜叶片中营养元素的含量,使铝离子大量累积,最终导致光合速率下降,幼苗光合作用能力减弱。适当添加外源 NO($50\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)后西瓜铝毒害得到缓解,叶片中 MDA 含量显著降低了 12.64%,SOD、POD、CAT 酶含量显著升高,脯氨酸含量显著升高,通过调节活性氧代谢来维持细胞结构功能稳定。添加外源 NO($50\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)显著降低铝元素在叶片中的积累,促进了叶片中叶绿素含量升高,使西瓜幼苗光合能力显著增强。当 NO 浓度为 $500\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时反而对西瓜具有毒害作用,地上、地下部生物量分别降低了 28.26% 与 3.57%,说明 NO 作用具有双重性。铝胁迫对西瓜生长、抗氧化酶、渗透调节物质、光合参数等生理特性均产生了抑制作用,而适当外施 NO 能缓解铝胁迫下西瓜的生理损伤,促进西瓜幼苗的生长。

关键词:西瓜;NO;铝胁迫;生理特性;营养元素含量

中图分类号:S651 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)08-1650-09 doi:10.11654/jaes.2021-0145

Effects of exogenous NO on growth and physiological characteristics of watermelon seedlings under aluminum stress

XIAO Jiachang, ZHENG Kaimin, MA Junying, ZHENG Yangxia*

(College of Horticulture, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: To alleviate the effect of exogenous NO on aluminum stress in watermelon, the effects of different concentrations of exogenous nitroprusside (SNP) ($50, 100, 200, \text{ and } 500\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) on the growth and physiological characteristics of watermelon seedlings under high concentrations of aluminum stress ($1\ 200\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) were studied using the Zaojia 84-24 watermelon variety as experimental material and SNP as NO donors. The results showed that the watermelon seedling growth under aluminum stress was depressed; watermelon leaf cell membrane permeability increased significantly; the product of membrane lipid peroxide malondialdehyde (MDA) increased by 14.18%; superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), and catalase (CAT) levels were significantly reduced; and soluble sugar and proline contents increased noticeably. Aluminum stress led to a significant decrease in chlorophyll content in leaves and affected the content of nutrient elements in watermelon leaves, resulting in a significant accumulation of aluminum ions; this eventually led to a decline in the photosynthetic rate and the seedling's weakened photosynthetic capacity. After the addition of exogenous NO ($50\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$), the aluminum toxicity of watermelon was alleviated; the MDA content in the leaves was significantly decreased by 12.64%; the contents of SOD, POD,

收稿日期:2021-02-03 录用日期:2021-04-19

作者简介:肖家昶(1997—),男,山西阳泉人,硕士研究生,主要从事西瓜逆境生理研究。E-mail:929144771@qq.com

*通信作者:郑阳霞 E-mail:754924349@qq.com

基金项目:四川省科技厅项目(2019ZHFP0268)

Project supported: The Science and Technology Department of Sichuan Province Project(2019ZHFP0268)

and CAT were increased; and the proline content was significantly increased, to regulate the metabolism of reactive oxygen species and maintain the stability of cell structure and function. Moreover, the accumulation of aluminum in leaves was significantly decreased. The chlorophyll content in leaves was increased, significantly enhancing the photosynthetic capacity of watermelon seedlings. When the concentration of NO was $500 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, it had a toxic effect on watermelon, and the biomass of aboveground and underground parts decreased by 28.26% and 3.57%, respectively, indicating that the duality effect of NO. Aluminum stress inhibited watermelon growth, antioxidant enzymes, osmotic regulatory substances, photosynthetic parameters, and other physiological characteristics. At the same time, the appropriate external application of NO could alleviate the physiological damage of watermelon under aluminum stress and promote the growth of watermelon seedlings.

Keywords: watermelon; NO; stress of aluminum; physiological characteristics; nutrient content

铝是地壳和土壤中含有最丰富的金属元素,约占地壳总矿质元素的7%。在正常土壤中,铝通常以对植物生长发育毒害较小的三水铝矿或无害的硅铝酸盐等沉淀物的形式存在^[1]。但在酸性土壤中(pH<5),铝从这些不溶物中释放出来形成对植物生长发育有较强毒性的 Al^{3+} ,造成酸铝毒害,不利于植物的生长。铝毒最明显的特征是抑制植物根尖生长,影响植物对水分及营养物质的吸收,从而导致植物生长受到抑制及农作物减产^[2]。我国南方地区土壤偏酸性,因此酸性土壤中的铝毒是限制当地作物生产的主要因素之一^[3]。

西瓜[Citrullus lanatus (Thunb.) Matsum. et Nakai]属于葫芦科植物,是我国重要的经济作物之一。我国是西瓜生产第一大国,其栽培面积、总产量和消费量均居世界首位^[4]。土壤酸化后导致活性铝的含量增加,这是引起西瓜连作障碍的原因之一,作为一种铝敏感瓜类作物,土壤的铝胁迫抑制了西瓜的生长发育,也严重影响西瓜的产量和品质^[5]。

一氧化氮(NO)是在植物体内以自由基形态存在的气体小分子信号物质,被认为是一种新型的“气体传递素”,能够调节植物生长发育,在植物受到胁迫时传导信息以提高植物抗逆能力^[6-7]。NO直接参与植物生长发育和胁迫反应的调节,目前研究表明:几乎所有的胁迫都能使植物激发活性氧(ROS)的产生,NO能与各种氧的形式发生反应,减少体内ROS的积累^[8]。NO还可通过调节植物体内的抗氧化酶类改善抗氧化酶的活性,清除体内产生的活性氧,降低膜质过氧化产物丙二醛的含量。除此以外,NO可以延缓胁迫下叶片叶绿素的降解,对光合作用起到间接的保护作用。一般可以将NO功能归纳为两个方面:一方面通过提高渗透调节物质脯氨酸以及抗氧化能力来增强植物耐盐性,另一方面NO可以作为一种信号分子通过提高质膜 H^{+} -ATPase活性,增强 $\text{K}^{+}/\text{Na}^{+}$ 值来抵

抗逆境胁迫^[9-10]。目前已有研究表明NO在大豆^[11]、土沉香^[12]、烟草^[13]、桉树^[14]等作物缓解铝胁迫上有明显作用。然而目前NO对西瓜铝胁迫的缓解作用还不清楚,本试验通过NO供体硝普钠(SNP)处理西瓜幼苗,探讨铝胁迫下外源NO对铝毒的调节作用,以期为进一步探讨缓解西瓜铝胁迫提供技术依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试西瓜品种为市售的“早佳84-24”。供试试剂为十八水合硫酸铝 $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}]$,分析纯]、硝普钠(SNP-NO供体, $\text{C}_5\text{H}_4\text{FeN}_6\text{Na}_2\text{O}_3$,分析纯)、亚硝基左旋精氨酸甲酯(L-NAME-NOS抑制剂, $\text{C}_7\text{H}_{15}\text{N}_3\text{O}_4 \cdot \text{HCl}$,分析纯)。

1.2 材料培养

选取大小均匀、健康饱满的西瓜种子,55℃温水浸种15 min,冷却至室温后继续浸种6 h,放入恒温箱中30℃催芽。种子露白后播种于装有珍珠岩、蛭石、有机肥(珍珠岩:蛭石:有机肥的质量比为4:3:1)的穴盘中,待幼苗长至两叶一心时将其移栽至10 cm×10 cm营养钵中,每3 d浇灌一次1/3 Hoagland营养液。试验地为四川农业大学园艺学院植物工厂,温度为25℃,光照强度5 000 lx,相对湿度75%,光-暗周期为16 h-8 h。

1.3 材料处理

采用 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 模拟铝胁迫试验,以SNP为外源NO供体,待西瓜幼苗三叶一心时,开始向根周围施用50 mL不同浓度处理液(以1/2 Hoagland营养液作为溶剂,分别添加浓度为 $1\ 200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的硫酸铝和不同浓度的SNP以及L-NAME)。共设7个处理,每个处理3次重复,每个重复24株幼苗。每3 d浇灌一次处理液,处理液的pH用HCl或NaOH调节到4.5,保证酸性条件,具体试验设计见表1。处理中硫酸铝浓度

表1 试验设计

Table 1 Experimental design

处理 Treatments	硫酸铝 The content of Al ³⁺ /($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	硝酸钠 The content of SNP/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	L-NAME/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	pH
CK	0	0	0	6.0
CKAl	1 200	0	0	4.5
N50	1 200	50	0	4.5
N100	1 200	100	0	4.5
N200	1 200	200	0	4.5
N500	1 200	500	0	4.5
N-L	1 200	100	100	4.5

为前期预试验筛选所得,NO浓度梯度选择参考NABI等^[10]。

1.4 测定方法

1.4.1 生长指标

处理15 d后,每处理随机选取5株幼苗进行生长指标测定,根长以及株高用直尺进行测量(分界点为根茎的节点位置),地上部和地下部的鲜质量清洗干净以后用纸巾吸干水分后放在电子天平进行称量记录,茎粗用游标卡尺进行测量。

1.4.2 生理指标

处理15 d后,每个处理随机选取15株幼苗,挑选完全展开的成熟叶片进行测定,测定的指标有超氧化物歧化酶(SOD)活性(均以鲜质量计,下同)、过氧化物酶(POD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性、丙二醛(MDA)含量、可溶性蛋白含量、可溶性糖含量、脯氨酸含量、叶绿素含量。各项指标均参照李合生^[15]和高俊凤^[16]的方法稍有改动。

1.4.3 叶绿素荧光参数及光合参数

处理10 d后,进行叶绿素荧光及光合参数的测

定。使用叶绿素荧光仪(PAM2500)测定西瓜幼苗第2片真叶的叶绿素荧光参数,将西瓜幼苗叶片放在暗室暗适应30 min后测定漫速荧光诱导曲线,仪器自动记录下初始荧光(F₀)、最大荧光(F_m)、最大光化学效率(F_v/F_m)、非光化学淬灭系数(q_N)、光化学淬灭系数(q_P)、电子传递速率(ETR)等荧光参数。

使用Li-6400便携式光合仪测定西瓜第2片真叶的光合参数,仪器自动记录净光合速率(以CO₂计)、气孔导度(以H₂O计)、胞间CO₂浓度(以CO₂计)、蒸腾速率(以H₂O计)等光合指标。测定光强为1 000 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,叶温为25 $^{\circ}\text{C}$,CO₂浓度为400 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,相对湿度为75%。

1.4.4 矿质元素含量测定

将植物叶片烘干粉碎,进行元素测定。钾、钙、镁、铁、锌、铜、铝元素含量测定:称取0.5 g样品置于锥形瓶中,加入4 mL高氯酸和16 mL硝酸,用保鲜膜封口过夜,在电热板上加热消煮定容后,用原子吸收分光光度计测定。磷元素测定采用钒钼黄比色法^[17]。

1.5 数据处理

采用Microsoft Excel 2016软件进行数据整理,使用SPSS 22.0进行统计分析,使用Origin 2019b进行作图,图表中数据为平均值 \pm 标准差。

2 结果与分析

2.1 不同浓度NO对铝胁迫下西瓜生长状况的影响

由表2可知,CKAl处理下西瓜生长明显受到抑制,其地上及地下部鲜质量、根长和根系活力与CK相比都有显著降低。而在添加外源NO后,西瓜受铝的抑制作用得到缓解,与CKAl相比,N50与N100的地上部鲜质量、地下部鲜质量、株高、根长、茎粗和根系活力均明显增加,N500处理下则表现为抑制西瓜生

表2 NO对铝胁迫下西瓜生长状况的影响

Table 2 Effects of NO on growth condition of watermelon under aluminum stress

处理 Treatments	地上部鲜质量 Plant fresh weight/g	地下部鲜质量 Root fresh weight/g	株高 Plant height/cm	根长 Root length/cm	茎粗 Stem thick/mm	根系活力 Root activity/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)
CK	16.19 \pm 4.97a	3.54 \pm 0.78bc	27.20 \pm 7.54abc	20.87 \pm 3.12a	6.57 \pm 0.91ab	29.18 \pm 1.58ab
CKAl	8.35 \pm 1.05c	2.24 \pm 0.46d	21.23 \pm 0.97cd	8.43 \pm 0.83c	5.50 \pm 1.22bc	22.49 \pm 1.27c
N50	17.31 \pm 2.44a	5.60 \pm 1.22a	32.77 \pm 5.90a	22.07 \pm 4.84a	6.73 \pm 0.38a	32.41 \pm 0.96a
N100	14.37 \pm 0.83ab	3.55 \pm 0.19bc	30.03 \pm 2.04ab	21.57 \pm 2.40a	6.67 \pm 0.49ab	24.46 \pm 0.84bc
N200	11.95 \pm 0.40b	4.03 \pm 0.16b	22.67 \pm 0.81bcd	20.70 \pm 4.13a	6.00 \pm 0.1abc	20.77 \pm 2.01c
N500	5.99 \pm 0.90c	2.16 \pm 0.49d	16.27 \pm 2.96d	14.33 \pm 3.62b	5.20 \pm 0.26c	14.33 \pm 4.55d
N-L	6.97 \pm 1.32c	2.65 \pm 0.29cd	17.47 \pm 4.39d	18.23 \pm 0.70ab	5.07 \pm 0.15c	23.40 \pm 5.60bc

注:不同小写字母表示处理间差异达显著水平($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

长发育。与N100相比,N-L处理各项指标均降低,说明50~100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NO可以缓解西瓜的铝胁迫,促进幼苗生长。

2.2 不同浓度NO对铝胁迫下西瓜抗氧化系统的影响

由图1可知,与CK相比,CKAI的SOD、POD、CAT活性均显著降低,MDA含量显著上升。与CKAI相比,外源NO可以提高西瓜幼苗抗氧化酶活性,降低MDA含量。在N100处理中,SOD与POD酶活性分别比CKAI高236.16%、19.86%,MDA含量降低了22.46%。CAT酶活性在N50处理时达到最高,比CKAI高33.82%。与N100相比,N-L处理下SOD、POD、CAT酶活性分别降低41.80%、9.72%、39.62%,MDA含量上升了19.12%。说明低浓度NO(50~200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)对西瓜叶片抗氧化酶的生成起积极作用,并且减少MDA含量的累积,但高浓度NO(500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)会抑制抗氧化酶的合成或加速抗氧化酶分解。

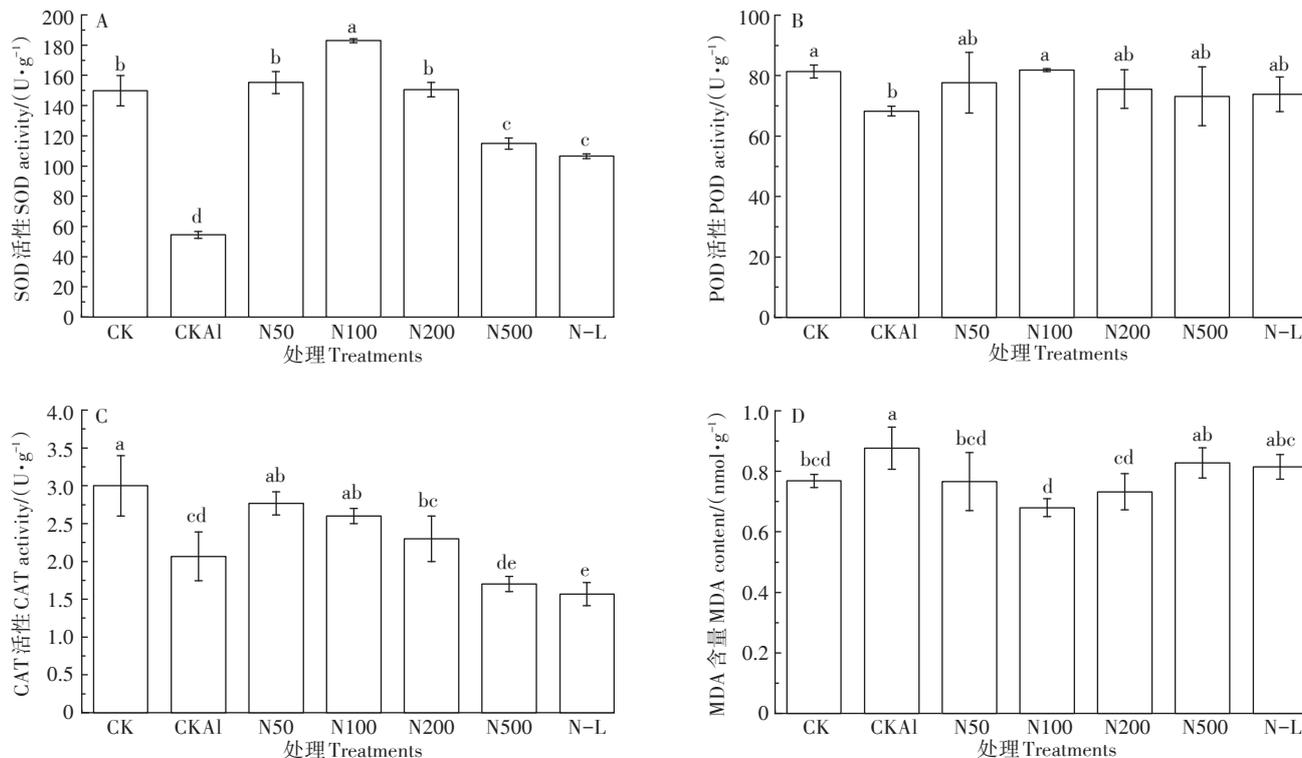
2.3 不同浓度NO对铝胁迫下西瓜渗透调节物质的影响

由图2可知,与CK相比,CKAI的可溶性糖与脯氨酸含量显著上升,可溶性蛋白含量没有显著差异。

外施NO后西瓜叶片中可溶性糖含量随着NO浓度升高不断增加,除N50处理外,与CKAI相比无显著差异。脯氨酸含量随着NO浓度的升高表现出低浓度(50~100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)促进而高浓度(500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)抑制趋势,可溶性蛋白含量处理间差异不显著。与N100处理相比,N-L处理中西瓜叶片可溶性糖含量上升了30.69%,脯氨酸含量下降了68.65%,可溶性蛋白含量无显著变化。由此说明NO主要通过影响脯氨酸与可溶性糖含量来缓解铝胁迫下西瓜叶片的铝毒损伤。

2.4 不同浓度NO对铝胁迫下西瓜光合特性的影响

由表3可知,处理10 d后,与CK相比,CKAI西瓜幼苗的叶绿素a含量、叶绿素b含量、净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)均明显下降。外施低浓度NO(50、100、200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)均促进了西瓜幼苗叶绿素a含量、叶绿素b含量、 P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 的上升。与CKAI相比,N50处理下叶绿素a含量、 P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 分别上升了67.16%、126.15%、250.00%、21.03%、152.03%。而N500处理下西瓜幼苗的叶绿素a含量、叶绿素b含量、 P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 则显著降低。N-L处理



不同小写字母代表处理间差异显著($P < 0.05$)。下同

Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same below

图1 外源NO对铝胁迫下西瓜叶片SOD、POD、CAT酶活性及MDA含量的影响

Figure 1 Effects of exogenous NO on activities of SOD, POD, CAT and content of MDA in watermelon leaves under aluminum stress

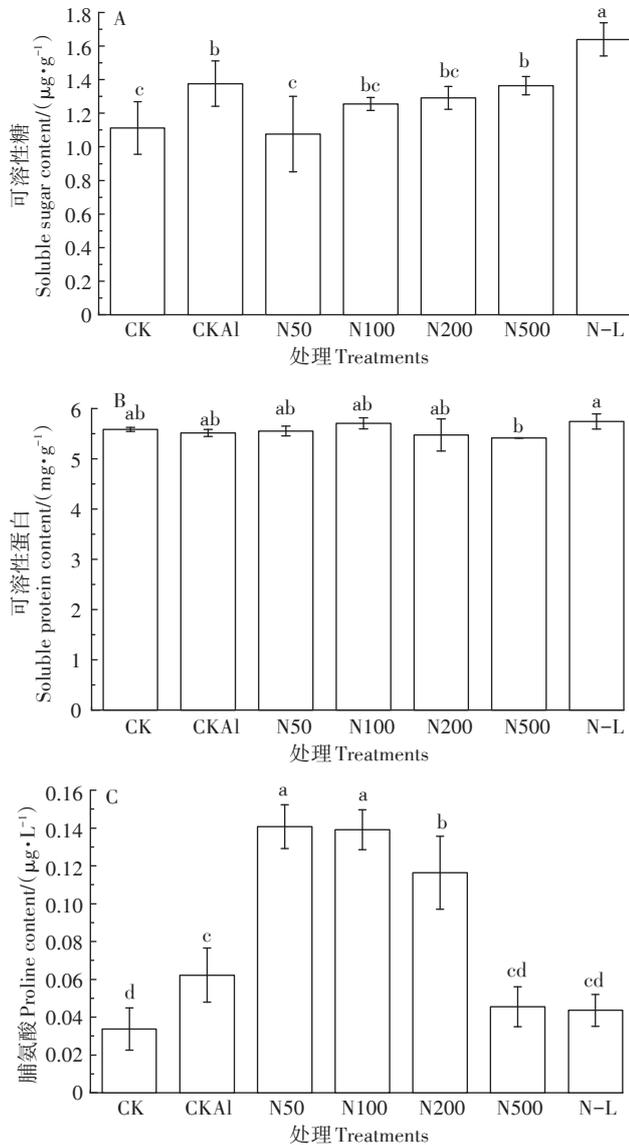


图2 外源NO对铝胁迫下西瓜叶片可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸含量的影响

Figure 2 Effects of exogenous NO on the contents of soluble sugar, soluble protein and proline in watermelon leaves under aluminum stress

下西瓜叶片叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、Pn、Gs、Ci、Tr 分别比 N100 下降了 28.44%、43.48%、45.42%、60.00%、13.30%、50.91%。由此可见,外源 NO 有助于提高铝胁迫下西瓜幼苗的净光合速率,从而增强光合作用能力。

由表 4 可以看出,处理 10 d 后,CKAl 西瓜叶片中初始荧光(F₀)值、最大荧光(F_m)值、PS II 最大光化学效率(F_v/F_m)、实际光合量子产量(ETR)、光化学淬灭系数(qP)均明显降低,与 CK 相比分别下降了 12.68%、15.18%、4.94%、25.40%、9.30%,非光化学淬灭系数(qN)上升了 63.89%。在施加外源 NO 后,西瓜叶片 F_v/F_m、ETR、qP 上升,qN 下降。N50 处理下 F_v/F_m、ETR 和 qP 比例显著上升,分别较 CKAl 上升了 6.49%、37.47%、11.54%,而 qN 较 CKAl 则显著下降了 45.76%,表明西瓜叶片用于光化学反应的光能比例上升。与 N100 相比,N-L 处理中西瓜幼苗 F_v/F_m、ETR、qP 下降,而 qN 上升。由此可见,铝胁迫显著抑制了西瓜光系统 II 电子传递速率,降低了西瓜的光合能力。施加 NO 可以增强西瓜叶片的相对电子传递速率,减少光系统 II 用于耗散为热量的光能比例,从而提高西瓜幼苗的净光合速率,这与光合参数的结果相吻合。

2.5 不同浓度 NO 对铝胁迫下西瓜营养元素的影响

由表 5 可知,与 CK 相比,CKAl 中西瓜叶片的钾、钙、镁元素含量不同程度减少,而叶片铁、铜、锌、铝、磷元素含量升高,其中铝元素的变化最大,与 CK 相比,CKAl 叶片铝含量上升了 192.67%。经不同浓度的 NO 处理后,西瓜叶片矿质元素的含量会随着处理浓度的改变而改变,并且不同的元素有不同的变化趋势。N50 处理西瓜叶片中钾、钙、镁、锌、磷含量分别比 CKAl 高了 4.67%、2.41%、0.03%、8.11%、21.41%,而铁、铜、铝含量分别比 CKAl 降低了 28.73%、

表 3 NO 对铝胁迫下西瓜叶绿素含量及光合参数的影响

Table 3 Effects of NO on chlorophyll content and photosynthetic parameters of watermelon under aluminum stress

处理 Treatments	叶绿素 a 含量 Chlorophyll a content/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	叶绿素 b 含量 Chlorophyll b content/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	净光合速率 Pn/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	气孔导度 Gs/($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	胞间 CO ₂ 浓度 Ci/($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	蒸腾速率 Tr/($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
CK	1.17±0.03a	0.46±0.01a	15.10±2.08b	0.20±0.06b	246.49±17.98ab	2.15±0.47b
CKAl	0.67±0.18c	0.27±0.09bc	8.26±2.65de	0.10±0.07cd	226.66±37.27b	1.23±0.66cd
N50	1.12±0.19a	0.44±0.07a	18.68±1.37a	0.35±0.09a	274.32±13.21a	3.10±0.44a
N100	1.09±0.08ab	0.46±0.08a	13.85±0.42bc	0.20±0.01bc	259.04±4.21ab	2.20±0.02b
N200	0.83±0.16bc	0.30±0.06b	10.93±0.43cd	0.15±0.01bcd	260.55±5.04ab	1.83±0.02bc
N500	0.55±0.06c	0.14±0.03c	5.18±2.73e	0.06±0.01d	243.10±44.56ab	0.78±0.16d
N-L	0.78±0.17c	0.26±0.08bc	7.56±1.26de	0.08±0.03d	224.59±18.25b	1.08±0.32d

表4 NO对铝胁迫下西瓜叶片叶绿素荧光参数的影响

Table 4 Effects of NO on chlorophyll fluorescence parameters of watermelon leaves under aluminum stress

处理 Treatments	F0	Fm	Fv/Fm	ETR	qN	qP
CK	0.71±0.02a	3.69±0.10a	0.81±0.01ab	99.10±7.83a	0.36±0.09b	0.86±0.04a
CKAl	0.62±0.05b	3.13±0.25ab	0.77±0.02c	73.93±10.04b	0.59±0.11a	0.78±0.01b
N50	0.68±0.03ab	3.66±0.19a	0.82±0.01a	101.63±5.9a	0.32±0.04b	0.87±0.04a
N100	0.67±0.05ab	3.40±0.23ab	0.80±0.01ab	82.63±15.88ab	0.48±0.09ab	0.83±0.01ab
N200	0.70±0.06ab	3.60±0.24a	0.81±0.01ab	79.26±9.80ab	0.56±0.03a	0.81±0.01ab
N500	0.66±0.01ab	3.40±0.11ab	0.79±0.02abc	81.83±13.16ab	0.49±0.15ab	0.76±0.07b
N-L	0.47±0.03c	2.64±0.97b	0.78±0.03bc	78.93±17.31ab	0.56±0.04a	0.79±0.02b

表5 NO对铝胁迫下西瓜叶片矿质元素的影响(mg·g⁻¹)Table 5 Effects of NO on mineral elements in watermelon leaves under aluminum stress(mg·g⁻¹)

处理 Treatments	磷含量 P content	钾含量 K content	钙含量 Ca content	镁含量 Mg content	铁含量 Fe content	铜含量 Cu content	锌含量 Zn content	铝含量 Al content
CK	4.648±0.181c	182.100±2.913a	68.950±1.613ab	28.100±0.114a	0.139±0.009c	0.013±0.001c	0.031±0.001d	0.191±0.029d
CKAl	5.502±0.294bc	172.766±4.801bc	67.816±0.278abc	27.275±0.458bc	0.181±0.016bc	0.016±0.001ab	0.037±0.001b	0.559±0.014b
N50	6.680±0.746a	180.833±4.271a	69.450±0.811a	27.283±0.080bc	0.129±0.074c	0.014±0.005bc	0.040±0.002a	0.409±0.082c
N100	5.433±0.212bc	168.233±1.205c	67.500±1.239abc	27.300±0.075b	0.191±0.019bc	0.015±0.001abc	0.036±0.001bc	0.362±0.027c
N200	5.917±0.236ab	168.233±1.201c	66.05±0.567bc	27.175±0.043bcd	0.238±0.013b	0.017±0.000ab	0.036±0.003bc	0.363±0.015c
N500	3.055±0.925d	174.666±2.502b	65.300±0.955c	26.750±0.413d	0.333±0.008a	0.018±0.000a	0.017±0.004e	0.725±0.019a
N-L	5.368±0.464bc	156.567±0.952d	65.825±3.362bc	26.800±0.114cd	0.183±0.008bc	0.018±0.000a	0.032±0.001cd	0.571±0.035b

12.50%、26.83%。与N100相比,N-L处理叶片中钾、钙、镁、铁、锌、磷元素吸收均受到抑制,而铜、铝元素吸收得到促进,说明NO会影响铝胁迫下西瓜叶片对各营养元素的积累,减少铝元素在叶片中的累积。

3 讨论

铝在土壤中大量富集后,会对植物的生长发育产生不利影响,进而影响品质及产量。本试验中铝胁迫处理显著抑制西瓜根系的伸长,同时对西瓜的生长有显著的抑制作用,这与前人描述铝胁迫下植物生长受到抑制的结论一致^[18-19]。自然状态下,植物在其生存环境中可产生一定量的NO。为了消除内源NO对试验结果的干扰,揭示铝胁迫下外源NO对西瓜抑制作用的缓解效应,本试验设置了NOS抑制剂L-NAME处理。结果表明(表2),添加外源NO能够明显促进铝胁迫下西瓜幼苗的株高、根长和鲜质量提高,说明通过外源NO处理,可以缓解铝胁迫对西瓜幼苗生长的抑制作用。

铝胁迫下植物体内会产生大量活性氧并积累,如果活性氧不能及时被清除,则会引起细胞受损,从而影响植物生理状态。植物膜脂过氧化过程中还会产

生丙二醛、脯氨酸以及一些渗透调节物质,胁迫程度越高,其含量越高。由此植物在进化过程中形成了一套抵御外界不良环境所形成的活性氧清除系统。SOD、POD、CAT等抗氧化酶能够有效地清除活性氧^[20]。其中SOD专一性地催化O₂^{·-}发生歧化反应生成O₂和H₂O₂,H₂O₂可以被POD和CAT清除^[21]。大量的研究表明,NO可通过提高渗透调节物质脯氨酸以及抗氧化能力来增强植物抗逆性,同时显著降低MDA含量,缓解逆境造成的损伤^[22]。本试验中(图1~图2),添加外源NO增加了铝胁迫下西瓜幼苗的SOD、POD、CAT酶活性及脯氨酸含量,并降低了MDA积累,减少了质膜过氧化的损伤。当NO浓度为50 μmol·L⁻¹时,脯氨酸含量上升了126.57%,在维持渗透平衡中起关键作用。西瓜叶片通过脯氨酸与可溶性糖、可溶性蛋白的共同积累来调节细胞渗透势,维持细胞间水分平衡,而加入NOS抑制剂L-NAME后脯氨酸含量下降,可以得出外源NO能够缓解铝胁迫对叶片膜系统造成的伤害。

光合色素参与植物光能的吸收、传递和转化,是反映光合能力的一个重要指标。当植物长期处于不良环境中,会出现叶绿素含量降低、光合作用速率下

降等特征^[23],光合作用是植物进行碳同化、积累有机物、为植物生长发育提供能量的过程^[24]。OHKL等^[25]的研究发现,随着铝胁迫浓度的增大,小麦(C3作物)和大豆(C4作物)中的叶绿体含量都显著减少,光合效率也明显下降。一般认为,光合速率和气孔导度存在一定的线性关系,即光合速率增强,气孔导度增大,而在光合作用受阻碍时,气孔导度减小,导致进入叶片内的CO₂减少^[26]。在本试验中(表3),高铝胁迫下(1 200 μmol·L⁻¹)西瓜叶片叶绿素含量减少,Pn、Gs、Tr、Ci均明显降低,说明铝胁迫引起的生物量下降与叶片净光合速率下降直接相关。且西瓜叶片中Pn与Gs、Ci同时下降,进一步说明西瓜叶片叶肉细胞光合能力降低的主导因素为铝胁迫抑制了西瓜叶片气孔的开度,导致细胞间隙CO₂浓度降低(气孔限制)。施加低浓度NO(50、100、200 μmol·L⁻¹)可以促进西瓜叶片叶绿素含量及Pn、Gs、Ci、Tr明显上升,表明NO可以促进西瓜叶片中叶绿素合成,从而促进西瓜叶片对光能的吸收和利用,并通过提高叶片气孔张开程度促进西瓜净光合速率的提高,最终促进西瓜幼苗的生长,证明外源NO可以逆转铝胁迫下西瓜气孔限制引起的光合速率的降低。除此以外,外施NO也能够维持大白菜、八宝景天等在胁迫下具有较高的光化学活性,保证光合作用的正常进行^[27-28]。

叶绿素荧光参数作为光合作用的经典测量方法,在植物叶片光合作用过程中对光能的吸收、传递、耗散、分配等具有独特的作用^[29]。逆境胁迫下,Fv/Fm降低是PS II反应中心受损、发生光抑制的显著特征。其次,叶绿素荧光是植物体内光合量子效率调节的一个重要方面,它分为光化学淬灭和非光化学淬灭两类。光化学淬灭系数(qP)反映了PS II天线色素吸收的光能用于光化学传递的份额,非光化学淬灭系数(qN)反映了PS II天线色素吸收的光能不能用于光合电子传递而以热的形式耗散掉的部分^[30]。研究表明,外源NO也可通过保护性热耗散机制缓解盐胁迫条件下山葡萄幼苗的光抑制,致使山葡萄叶片的PS II最大光化学效率(Fv/Fm)、PS II实际光化学效率(ΦPS II)、光化学淬灭系数(qP)和保护性热耗散(ΦNPQ)均升高,非调节性能量耗散(ΦNO)显著下降^[31]。本试验中(表4),铝胁迫下西瓜叶片F0、Fm、Fv/Fm、qP均显著降低,说明细胞膜系统受到破坏,PS II反应中心受到破坏或失活,光合电子传递受阻,使西瓜叶片用于非光化学淬灭的比例较高,用于光化学反应的能量减少,由此可以解释铝胁迫下西瓜叶片光能利用转化

效率降低以及光合能力减弱。在添加适当浓度(50 μmol·L⁻¹)NO后可以提高西瓜叶片的潜在光能转化效率,增加光系统II的相对电子传递速率,使光系统II中用于光化学反应的份额增加,减少能量以热形式耗散。说明外施NO对铝胁迫下西瓜电子传递效率起积极作用,有助于提高西瓜光合能力。

铝毒害严重影响作物的生长和产量,其中重要的因素就是影响植物的根系矿质元素的吸收和运输,各种生理生化过程受到抑制,从而导致生产力下降,品质降低。本试验中(表5),铝胁迫抑制了西瓜叶片钾、钙、镁元素积累,而钾和钙对植物光合作用气孔开闭和同化物的运输具有调节作用,镁直接参与叶绿体中叶绿素、蛋白质的构成,可以推断出钾、钙、镁元素含量降低是西瓜光合能力减弱的原因之一。在茶树^[32]、泡桐幼苗^[33]等研究中也发现了铝胁迫抑制了植株对营养元素的累积,这与前人研究结果一致。其机制可能与大量铝离子与阳离子竞争结合位点,导致离子通道阻塞、根系呼吸作用降低有关^[34]。在添加NO为50 μmol·L⁻¹时,促进了叶片中钾、钙、镁、铁、锌、磷元素含量的上升,显著抑制了铝元素的累积,其中铁是电子传递体重要成分,锌参与叶绿素的合成以及是SOD的重要活化剂,磷元素组成的ATP、FMN、NAD⁺、NADP⁺直接参与光合呼吸代谢。由此可以说明NO能够有效缓解铝诱导的膜结构破坏和光合呼吸代谢生理紊乱等不利影响,促进西瓜幼苗光合同化及能量转换。而当NO浓度为500 μmol·L⁻¹时,这种缓解作用消失,甚至抑制了西瓜叶片对营养元素的累积,分析其原因可能与本试验中高浓度的NO导致西瓜叶片氧化系统遭受破坏和细胞受到伤害有关^[35],具体原因有待进一步探讨。

4 结论

(1)铝胁迫致使西瓜叶片质膜过氧化程度加深,降低了西瓜叶片的光合能力,并影响了营养元素的积累,从而导致了西瓜幼苗生长受到抑制。

(2)NO可以通过增强西瓜叶片中的抗氧化酶活性来减轻质膜过氧化损伤,并促进了幼苗对营养元素的积累,最终提高了叶片的光合能力,促进西瓜幼苗生长。但高浓度的NO处理对西瓜铝胁迫并没有起到缓解作用,甚至会抑制西瓜幼苗的生长。

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. WU D M, FU Y Q, YU Z W, et al. Current situation and control of acidification and aluminum toxicity in red soil in southern China[J]. *Soils*, 2013, 45(4):577-584.
- [2] 王维君. 我国南方一些酸性土壤铝存在形态的初步研究[J]. 热带亚热带土壤科学, 1995, 4(1):1-8. WANG W J. A preliminary study on the form of aluminum in some acidic soils in southern China[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Soil Science*, 1995, 4(1):1-8.
- [3] 陈小丽. 铝在土壤固/液相中化学行为的研究进展[J]. 广西农学报, 2006, 21(4):38-43. CHEN X L. Research progress on chemical behavior of aluminum in soil solid/liquid phase[J]. *Journal of Guangxi Agricultural*, 2006, 21(4):38-43.
- [4] 李干琼, 王志丹. 我国西瓜产业发展现状及趋势分析[J]. 中国瓜菜, 2019, 32(12):79-83. LI G Q, WANG Z D. Analysis of current situation and trend of development of watermelon industry in China[J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2019, 32(12):79-83.
- [5] 贾松涛, 郑阳霞, 邱爽, 等. 铝胁迫对西瓜幼苗生长及生理特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8):1485-1492. JIA S T, ZHENG Y X, QIU S, et al. Effects of aluminum stress on growth and physiological characteristics of watermelon seedlings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(8):1485-1492.
- [6] PAUL S, ROYCHOUDHURY A. Regulation of physiological aspects in plants by hydrogen sulfide and nitric oxide under challenging environment[J]. *Physiologia Plantarum*, 2020, 168(2):374-393.
- [7] ANNALISA P, BARBARA M, MARIA P, et al. Nitric oxide-mediated transcriptional changes in *Arabidopsis thaliana*[J]. *Molecular Plant-microbe Interactions*, 2003, 16(12):1094-1101.
- [8] Greenacre S A, Ischiropoulos H. Tyrosine nitration: Localisation, quantification, consequences for protein function and signal transduction[J]. *Free Radical Research*, 2001, 34(6):541-581.
- [9] KWON E, FEECHAN A, YUN B, et al. ATGSNOR1 function is required for multiple developmental programs in arabidopsis[J]. *Planta*, 2012, 236(3):887-900.
- [10] NABI R, TAYADE R, HUSSAIN A, et al. Nitric oxide regulates plant responses to drought, salinity, and heavy metal stress[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2019, 161:120-133.
- [11] 侯俊杰. 铝胁迫下NO对大豆根系柠檬酸分泌的调控机制[D]. 新乡:河南师范大学, 2018. HOU J J. Regulation mechanism of NO on citric acid secretion in soybean roots under aluminum stress[D]. Xinxiang:Henan Normal University, 2018.
- [12] 钟铭隆. 一氧化氮对酸铝胁迫下土沉香幼苗生长生理特性的影响[D]. 南宁:广西大学, 2016:4-5. ZHONG M L. Effects of nitric oxide on growth and physiological characteristics of aloes seedlings under aluminum acid stress[D]. Nanning:Guangxi University, 2016:4-5.
- [13] 刘强, 柳正葳, 胡萃, 等. 外源一氧化氮对铝胁迫下烟草叶片呼吸作用和活性氧代谢的影响[J]. 河南农业科学, 2017, 46(1):42-47. LIU Q, LIU Z W, HU C, et al. Effects of exogenous nitric oxide on respiration and reactive oxygen metabolism in tobacco leaves under aluminum stress[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2017, 46(1):42-47.
- [14] 侯文娟, 罗文姬, 韦洁, 等. 尾巨桉DH3229幼苗对硝普钠-酸铝互作的响应[J]. 广西植物, 2019, 39(4):437-445. HOU W J, LUO W J, WEI J, et al. Response of *Eucalyptus grandis* DH3229 seedlings to sodium nitroprusside and aluminum acid interaction[J]. *Guihaia*, 2019, 39(4):437-445.
- [15] 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. LI H S. Principles and techniques of plant physiological and biochemical experiments[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [16] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社, 2006. GAO J F. Plant physiology experiment instruction[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2000. BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [18] RIYAZUDDIN, RAO T N, HUSSAIN I, et al. Effect of aluminum trihydroxide/zinc borate and aluminium trihydroxide/melamine flame retardant systems synergies on epoxy resin[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 27(3):2269-2272.
- [19] MAYANDI S, WALTER J H. The distal part of the transition zone is the most aluminum-sensitive apical root zone of maize[J]. *Plant Physiology*, 1998, 116(1):155-163.
- [20] 赵颖, 魏小红, 李桃桃. 外源NO对混合盐碱胁迫下藜麦种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 草业学报, 2020, 29(4):92-101. ZHAO Y, WEI X H, LI T T. Effects of exogenous NO on seed germination and seedling growth of quinoa under mixed saline-alkali stress[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(4):92-101.
- [21] 陈晟, 施木田, 吴宇芬, 等. 硼胁迫对不同类型西瓜活性氧代谢与抗氧化系统的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(4):60-64. CHEN S, SHI M T, WU Y F, et al. Effects of boron stress on active oxygen metabolism and antioxidant system of different genotypes of watermelon cultivars[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(4):60-64.
- [22] 杨璞, 高彩红. 外源一氧化氮对逆境胁迫下小麦的保护效应[J]. 天津农业科学, 2020, 26(5):27-31. YANG P, GAO C H. Protective effect of exogenous nitric oxide on wheat under stress[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2020, 26(5):27-31.
- [23] 张慧敏, 刘东华. 铝对蚕豆叶绿素荧光和叶绿素含量影响探讨[J]. 绿色科技, 2019, 12:15-19. ZHANG H M, LIU D H. Effect of aluminum on chlorophyll fluorescence and chlorophyll content in broad bean[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2019, 12:15-19.
- [24] 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. ZHANG X X, CHEN S S, ZHENG T, et al. Effects of aluminum stress on reactive oxygen metabolism and photosynthetic response characteristics of leaves of *Ardisia mamillata* Hance[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(1):72-75.
- [25] OHKI K. Photosynthesis, chlorophyll, and transpiration responses in aluminum stressed wheat and sorghum1[J]. *Crop Science*, 1986, 26(3):572-572.
- [26] 赵会娥, 贺立源, 章爱群, 等. 铝胁迫对植物光合作用的影响及其机理的研究进展[J]. 华中农业大学学报, 2008, 27(1):155-160. ZHAO H E, HE L Y, ZHANG A Q, et al. Research progress on effects

- of aluminum stress on plant photosynthesis and its mechanism[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2008, 27(1):155-160.
- [27] 王丽梅, 胡琳莉, 朱永超, 等. 一氧化氮对弱光下小型大白菜幼苗生长及光合作用的影响[J]. *西北植物学报*, 2016, 36(8):1615-1622. WANG L M, HU L L, ZHU Y C, et al. Effects of nitric oxide on growth and photosynthesis of small Chinese cabbage seedlings under low light[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2016, 36(8):1615-1622.
- [28] 陈志新, 陈伟楠, 胡增辉, 等. 一氧化氮对盐胁迫下八宝景天叶片生理特性的影响[J]. *北京农学院学报*, 2018, 33(3):66-72. CHEN Z X, CHEN W N, HU Z H, et al. Effects of nitric oxide on physiological characteristics of the leaves of *Sedum sinensis* under salt stress[J]. *Journal of Beijing University of Agriculture*, 2018, 33(3):66-72.
- [29] 尤鑫, 龚吉蕊. 叶绿素荧光动力学参数的意义及实例辨析[J]. *西部林业科学*, 2012, 41(5):90-94. YOU X, GONG J R. Significance of kinetic parameters of chlorophyll fluorescence and discrimination of examples[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2012, 41(5):90-94.
- [30] 孙德智, 韩晓日, 彭靖, 等. 外源NO和水杨酸对盐胁迫下番茄幼苗光合机构的保护作用[J]. *应用与环境生物学报*, 2018, 24(3):457-464. SUN D Z, HAN X R, PENG J, et al. Protective effects of exogenous NO and salicylic acid on photosynthetic mechanism of tomato seedlings under salt stress[J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2018, 24(3):457-464.
- [31] 赵滢, 王振兴, 艾军, 等. 外源一氧化氮对盐胁迫下山葡萄叶片叶绿素荧光特性的影响[J]. *北方园艺*, 2012(17):33-35. ZHAO Y, WANG Z X, AI J, et al. Effects of exogenous nitric oxide on chlorophyll fluorescence characteristics of down-mountain grape leaves under salt stress[J]. *Northern Horticulture*, 2012(17):33-35.
- [32] 郑功宇, 陈寿松, 苏培凌, 等. 铝对茶叶主要化学品质影响的研究进展[J]. *茶叶科学技术*, 2013(3):1-5, 10. ZHENG G Y, CHEN S S, SU P L, et al. Research progress on the effect of aluminum on the main chemical quality of tea[J]. *Acta Tea Sinica*, 2013(3):1-5, 10.
- [33] 刘森, 李鹏, 李春华, 等. 泡桐幼苗对铝胁迫的生理响应[J]. *中南林业科技大学学报*, 2020, 40(6):44-52, 62. LIU S, LI P, LI C H, et al. Physiological response of paulownia seedlings to aluminum stress [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2020, 40(6):44-52, 62.
- [34] YAMAMOTO Y, KOBAYASHI Y, DEVI S R, et al. Aluminum toxicity is associated with mitochondrial dysfunction and the production of reactive oxygen species in plant cells[J]. *Plant Physiology*, 2002, 128(1):63-72.
- [35] 刘锐涛, 张颖, 樊秀彩, 等. 一氧化氮在植物抗病反应中的作用机制[J]. *植物生理学报*, 2020, 56(4):40-49. LIU R T, ZHANG Y, FAN X C, et al. Mechanisms of nitric oxide in plant disease resistance [J]. *Plant Physiology Communications*, 2020, 56(4):40-49.