

# 镧对铬胁迫下小麦幼苗抗氧化特性的影响

包东娥<sup>1</sup>, 高尚<sup>2</sup>, 单长卷<sup>2\*</sup>

(1. 河南科技学院数学科学学院 河南 新乡 453003; 2. 河南科技学院生命科学学院, 河南 新乡 453003)

**摘要:**为探究镧对铬胁迫下小麦幼苗抗氧化特性的影响,本研究先以不同浓度氯化铬( $\text{CrCl}_3$ )溶液对小麦幼苗进行处理以筛选适宜的处理浓度,然后再以不同浓度 $\text{LaCl}_3$ (20  $\mu\text{mol/L}$ 、60  $\mu\text{mol/L}$ 、120  $\mu\text{mol/L}$ )溶液对铬胁迫下小麦幼苗进行处理并测定处理后幼苗抗氧化特性相关指标。结果表明,铬胁迫显著提高小麦幼苗丙二醛(MDA)和过氧化氢( $\text{H}_2\text{O}_2$ )含量,显著降低抗坏血酸(AsA)含量。同时,显著提高超氧化物歧化酶(SOD)和谷胱甘肽还原酶(GR)活性,并显著降低抗坏血酸过氧化物酶(APX)和过氧化氢酶(CAT)活性。 $\text{LaCl}_3$ 处理能够显著降低铬胁迫下小麦幼苗中MDA、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 和AsA含量,同时降低SOD活性,提高APX、GR和CAT的活性。说明铬会对小麦幼苗造成过氧化伤害, $\text{LaCl}_3$ 能够通过调控小麦中抗氧化物质含量及抗氧化酶的活性,来提升其抗氧化能力,抵御铬造成的胁迫。其中以浓度60  $\mu\text{mol/L}$   $\text{LaCl}_3$ 处理效果最佳,可以用于实际生产中以提高小麦的抗铬胁迫能力。

**关键词:**镧;小麦;重金属;铬胁迫;抗氧化物质;抗氧化酶

中图分类号: S512.11

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2023)06-0015-05

## Effects of Lanthanum on Antioxidant Properties of Wheat Seedlings under Chromium Stress

BAO Dong'e<sup>1</sup>, GAO Shang<sup>2</sup>, SHAN Changjuan<sup>2\*</sup>

(1. School of Mathematical Sciences, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003; 2. School of Life Science, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China)

**Abstract:** To investigate the effects of lanthanum on the antioxidant properties of wheat seedlings under chromium stress, wheat seedlings were treated with different concentrations of chromium chloride ( $\text{CrCl}_3$ ) firstly to screen suitable concentrations of chromium in this study. Wheat seedlings were treated with different concentrations of  $\text{LaCl}_3$  (20, 60, 120  $\mu\text{mol/L}$ ) under chromium stress and the indicators related with the antioxidant properties were measured. The results showed that the contents of malondialdehyde(MDA), hydrogen peroxide ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) and ascorbic acid (AsA) in wheat seedlings were significantly increased by chromium stress. Meanwhile, the activities of superoxide dismutase (SOD) and glutathione reductase (GR) were significantly increased, the activities of ascorbate peroxidase (APX) and catalase (CAT) were significantly decreased. Exogenous  $\text{LaCl}_3$  could significantly reduce the contents of MDA,  $\text{H}_2\text{O}_2$  and AsA in wheat seedlings under chromium stress. Meanwhile, the activity of SOD was reduced and the activities of APX, GR and CAT were improved. It indicated that heavy metal chromium would cause peroxidation damage to wheat seedlings. Exogenous  $\text{LaCl}_3$  could improve its antioxidant capacity by regulating the contents of antioxidant substances and the activities of antioxidant enzymes in wheat, thus resist the stress caused by heavy metal chromium and improve the anti-chromium property of wheat. 60  $\mu\text{mol/L}$   $\text{LaCl}_3$  had the best effect, which could be used in production.

**Key words:** Lanthanum; Wheat; Heavy metal; Chromium stress; Antioxidant substances; Antioxidant enzymes

收稿日期: 2021-12-16

基金项目: 河南省高校重点科研项目(18B180009)

作者简介: 包东娥(1982-),女,副教授,硕士,从事应用统计及其农业应用研究。

通讯作者: 单长卷,男,博士,教授, E-mail: shchjuan1978@aliyun.com

小麦是我国重要的粮食作物,在社会稳定及经济发展中起着重要作用。近年来,随着重金属铬(Cr)在工业生产中的推广应用,土地铬污染问题也愈发显著,对农作物生长造成严重影响<sup>[1]</sup>。在重金属条件下,植物细胞内活性氧自由基的产生和清除间的平衡被打破,自由基大量积聚在细

胞中,破坏细胞膜结构,进而影响作物生长。通常情况下,植物自身具有抗氧化系统,主要由SOD、APX、GR和CAT等抗氧化酶和AsA、GSH等非酶物质构成,在这些抗氧化物质和抗氧化酶的共同作用下,自由基能够及时被清除,进而缓解胁迫对植物生长造成的不利影响<sup>[2-3]</sup>。

稀土元素镧(La)被证明在提升作物产量、品质及抗逆性等方面起重要作用。于晨曦等<sup>[4]</sup>研究表明,叶面喷施镧肥对丹参的品质及产量起促进作用。王起凡等<sup>[5]</sup>研究表明,镧处理能够显著提升重金属铅胁迫下玉米植株对微量元素的吸收能力,改善植物的生长状况,减少植株对铅的吸收。庞春花等<sup>[6]</sup>研究表明,镧溶液浸泡处理能够促进藜麦种子的萌发,并通过提高抗氧化酶的活性,增加渗透调节物质,进而缓解盐胁迫对植物造成的伤害。类似的结果在对大豆<sup>[7]</sup>、水稻<sup>[8]</sup>、白喜草<sup>[9]</sup>的研究中均有报道。然而,有关镧对铬胁迫下小麦抗氧化特性的影响相关研究较少。因此,研究镧对铬胁迫下小麦幼苗抗氧化特性的影响,对提高小麦抗铬胁迫能力具有重要意义。

本试验以“百农207”小麦为材料,对铬胁迫条件下的小麦幼苗进行氯化镧(LaCl<sub>3</sub>)处理,并对幼苗中的抗氧化物质含量及相关酶活性进行测定。旨在探讨铬胁迫下镧对小麦叶片抗氧化特性的影响,从而揭示镧调控小麦抗铬胁迫能力的生理机制,以期对稀土元素镧在小麦生产中减轻铬胁迫的应用提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

本试验以“百农207”小麦为材料。挑选饱满、一致的小麦种子共240粒,蒸馏水洗净后晾干,用0.1%氯化汞(HgCl<sub>2</sub>)溶液浸泡30 min消毒,再用蒸馏水浸泡24 h,之后转移至培养皿中,置于25℃恒温培养箱中培养。对重金属铬设5种浓度处理,即0(蒸馏水处理,CK)、20、40、80、100 mg/L CrCl<sub>3</sub>处理,每个处理5次重复。3 d后,观察幼苗生长状况,发现100 mg/L CrCl<sub>3</sub>处理的小麦幼苗叶片有明显的萎蔫现象,故选用100 mg/L CrCl<sub>3</sub>作为本研究中适宜的铬胁迫浓度。

### 1.2 试验设计

采用100 mg/L CrCl<sub>3</sub>模拟铬胁迫处理,以蒸馏水处理为对照(CK),分别用20 μmol/L LaCl<sub>3</sub>+100 mg/L CrCl<sub>3</sub>(T<sub>1</sub>)、60 μmol/L LaCl<sub>3</sub>+100 mg/L CrCl<sub>3</sub>(T<sub>2</sub>)、120 μmol/L LaCl<sub>3</sub>+100 mg/L CrCl<sub>3</sub>(T<sub>3</sub>)进行铬

胁迫下的镧处理。在处理3 d后,分别测定小麦幼苗叶片丙二醛(MDA)、抗坏血酸(AsA)、过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)和谷胱甘肽(GSH)含量以及超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)、谷胱甘肽还原酶(GR)活性,每个处理5次重复。

### 1.3 测定方法

MDA含量参照阳妮等<sup>[10]</sup>的方法测定,抗坏血酸含量参照Hodges等<sup>[11]</sup>的方法进行测定,H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量采用硫酸钛比色法<sup>[12]</sup>测定,GSH含量参照Griffith等<sup>[13]</sup>的方法进行测定。APX活性参照刘俊美等<sup>[14]</sup>的方法测定,将每分钟吸光值变化0.1定义为一个酶活力单位;GR及CAT活性参照Zheng等<sup>[15]</sup>的方法进行测定,其中GR活性以每分钟吸光值变化0.01定义为一个酶活力单位,CAT活性以每分钟吸光值变化0.1定义为一个酶活力单位;SOD活性采用氮蓝四唑光还原法测定<sup>[16]</sup>,以抑制50% NBT反应为1个酶活性单位。

### 1.4 数据处理

所得数据采用Excel 2019进行整理计算,SPSS 25进行单因素方差分析及相关性分析,Visio 2019进行制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同浓度LaCl<sub>3</sub>溶液处理对铬胁迫下小麦幼苗MDA、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量的影响

如图1和图2所示,与CK相比,铬胁迫使小麦幼苗中的MDA和H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量分别显著提升255.2%和207.7%。相比单独铬胁迫处理,T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>处理下小麦幼苗中MDA含量分别下降16.9%、37.4%和19.2%,H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量分别下降13.7%、40.0%和31.3%。说明铬胁迫会对小麦幼苗的抗氧化系统造成显著影响,导致了小麦幼苗的细胞膜质发生了过氧化,对小麦植株正常生长发育造成损害。通过镧溶液处理,小麦幼苗受胁迫程度明显降

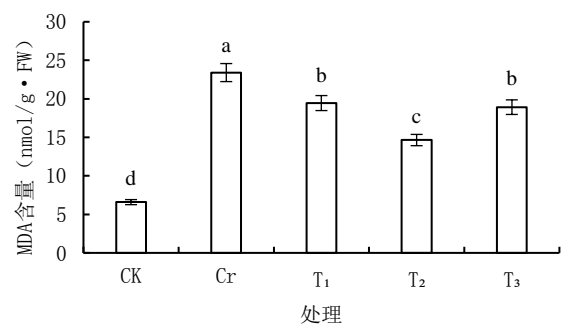


图1 不同浓度LaCl<sub>3</sub>溶液处理对铬胁迫下小麦幼苗MDA含量的影响

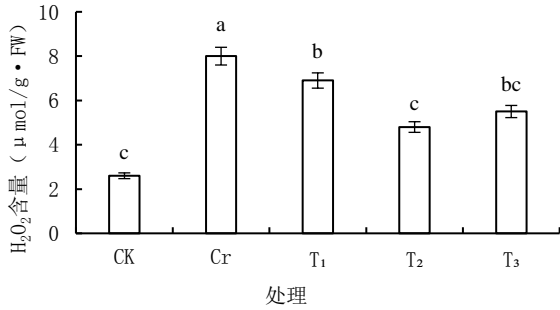


图2 不同浓度LaCl<sub>3</sub>溶液处理对铬胁迫下小麦幼苗H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量的影响

低,其中以60 μmol/L LaCl<sub>3</sub>处理效果最佳。

### 2.2 不同浓度LaCl<sub>3</sub>溶液处理对铬胁迫下小麦幼苗GSH、AsA含量的影响

如图3和图4所示,与CK相比,铬胁迫使小麦幼苗中的GSH和AsA含量分别降低1.0%和47.1%。相比单独铬胁迫处理,T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>处理下小麦幼苗中GSH含量分别提升2.7%、1.7%和1.9%,AsA含量则分别提升27.9%、58.9%和50.9%。说明铬胁迫会显著降低小麦幼苗中AsA含量。通过镧溶液处理,铬胁迫下小麦幼苗中AsA含量有显著提升。但无论是铬胁迫或是施加镧溶液,小麦中GSH含量变化均不显著。

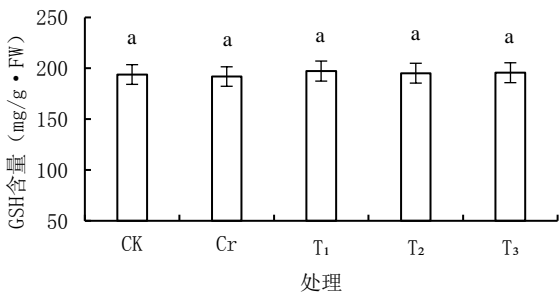


图3 不同浓度LaCl<sub>3</sub>溶液处理对铬胁迫下小麦幼苗GSH含量的影响

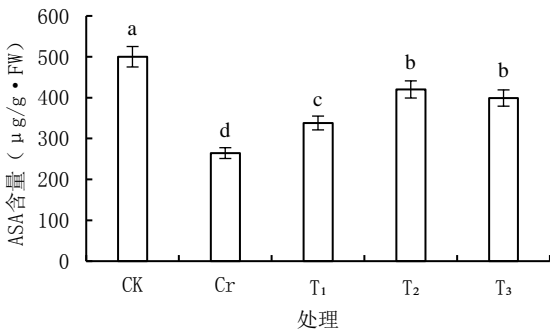


图4 不同浓度LaCl<sub>3</sub>溶液处理对铬胁迫下小麦幼苗AsA含量的影响

### 2.3 不同浓度LaCl<sub>3</sub>溶液处理对铬胁迫下小麦幼苗SOD、APX、GR和CAT活性的影响

如图5、图6、图7、图8所示,与CK相比,铬胁迫会使小麦幼苗中SOD和GR活性分别提高24.6%和81.8%,APX和CAT活性分别降低82.6%和

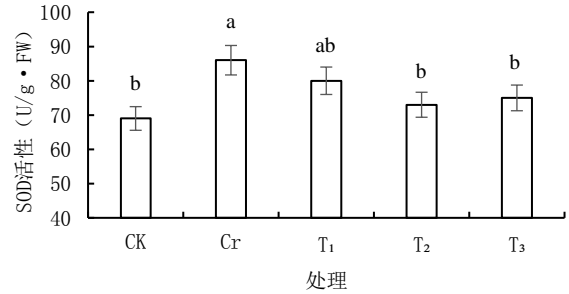


图5 不同浓度LaCl<sub>3</sub>溶液处理对铬胁迫下小麦幼苗SOD活性的影响

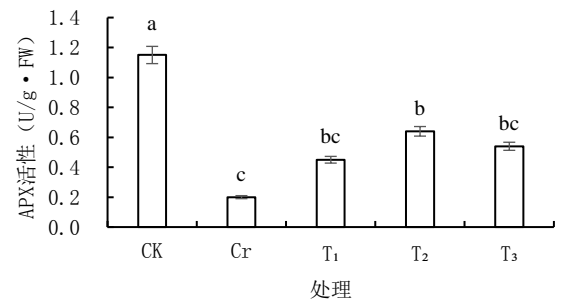


图6 不同浓度LaCl<sub>3</sub>溶液处理对铬胁迫下小麦幼苗APX活性的影响

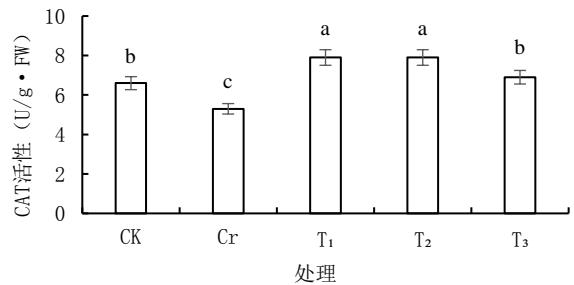


图7 不同浓度LaCl<sub>3</sub>溶液处理对铬胁迫下小麦幼苗CAT活性的影响

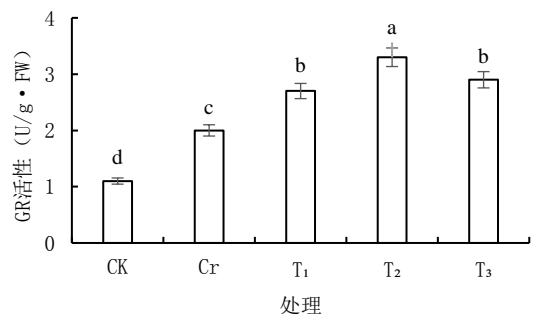


图8 不同浓度LaCl<sub>3</sub>溶液处理对铬胁迫下小麦幼苗GR活性的影响

19.7%。相比单独铬胁迫处理,  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 处理下小麦幼苗中 SOD 活性分别降低 6.9%、15.1%、12.8%, APX 活性分别提高 125%、220% 和 170%, GR 活性分别提高 35.0%、65.0% 和 45.0%, CAT 活性分别提高 49.1%、49.1% 和 30.2%。说明小麦幼苗自身会通过提高 SOD 和 GR 活性调动自身抗氧化系统对抗外界铬胁迫对植株造成的过氧化伤害。通过镧处理, 小麦植株中的 APX、GR 和 CAT 活性均得到提高, 上述抗氧化酶活性的提高有助于小麦幼苗对抗外界胁迫, 增强抗氧化能力, 减轻铬胁迫对幼苗造成的损害, 其中以 60  $\mu\text{mol/L}$   $\text{LaCl}_3$  处理效果最佳。

#### 2.4 $\text{LaCl}_3$ 溶液浓度与小麦幼苗抗氧化酶活性及抗氧化物质含量的相关性分析

通过对  $\text{LaCl}_3$  溶液浓度与小麦幼苗中抗氧化物质含量及相关酶的活性进行皮尔森相关性分析发现,  $\text{LaCl}_3$  溶液浓度变化 (0~120  $\mu\text{mol/L}$ ) 与相应的抗氧化物质含量及相关酶活性间未表现出明显的相关性 (表 1)。但在 0~60  $\mu\text{mol/L}$   $\text{LaCl}_3$  变化区间内却呈现较为显著的相关性 (表 2)。说明 120  $\mu\text{mol/L}$   $\text{LaCl}_3$  处理已对植物形成了一定负面效果, 对小麦幼苗的生长及抗铬能力产生不利影响。在 0~60  $\mu\text{mol/L}$   $\text{LaCl}_3$  浓度变化区间中,  $\text{LaCl}_3$  溶液浓

表 1 0~120  $\mu\text{mol/L}$  浓度范围内  $\text{LaCl}_3$  溶液浓度与小麦幼苗抗氧化酶活性及抗氧化物质含量的相关性分析

	MDA	$\text{H}_2\text{O}_2$	GSH	AsA	SOD	APX	GR	CAT
$\text{LaCl}_3$ 浓度	-0.498	-0.766	0.378	0.79	-0.782	0.692	0.637	0.308
MDA		0.933	-0.56	-0.923	0.929	-0.957*	-0.979*	-0.833
$\text{H}_2\text{O}_2$			-0.49	-0.990*	0.992**	-0.967*	-0.964*	-0.687
GSH				0.602	-0.593	0.685	0.658	0.895
AsA					-1.000**	0.986*	0.975*	0.749
SOD						-0.986*	-0.977*	-0.749
APX							0.996**	0.846
GR								0.854

注: “\*\*”表示在 0.01 级别上相关性显著, “\*”表示在 0.05 级别上相关性显著, 下同

表 2 0~60  $\mu\text{mol/L}$  浓度范围内  $\text{LaCl}_3$  溶液浓度与小麦幼苗抗氧化酶活性及抗氧化物质含量的相关性分析

	MDA	$\text{H}_2\text{O}_2$	GSH	AsA	SOD	APX	GR	CAT
$\text{LaCl}_3$ 浓度	-0.991**	-0.995**	0.448	0.987*	-0.989*	0.964*	0.973*	0.756
MDA		0.992	-0.564	-1.000*	1.000**	-0.991	-0.995	-0.837
$\text{H}_2\text{O}_2$			-0.459	-0.989	0.991	-0.967	-0.975	-0.763
GSH				0.584	-0.573	0.67	0.644	0.924
AsA					-0.998**	0.994	0.997*	0.85
SOD						-0.992	-0.996	-0.843
APX							0.999*	0.903
GR								0.887

度与 MDA ( $r=-0.991$ ) 与  $\text{H}_2\text{O}_2$  ( $r=-0.995$ ) 含量间均存在极显著负相关关系, 与 AsA ( $r=0.987$ ) 含量呈显著正相关关系。此外,  $\text{LaCl}_3$  溶液浓度还与 APX ( $r=0.964$ ) 和 GR ( $r=0.973$ ) 活性存在显著正相关关系, 与 SOD ( $r=-0.989$ ) 活性存在显著负相关关系。说明镧溶液主要通过调动 APX 和 GR 两种酶的活性, 同时提高 AsA 含量, 降低 MDA 和  $\text{H}_2\text{O}_2$  含量, 从而提高小麦幼苗的抗氧化能力来对抗铬胁迫对植株造成的伤害。根据上述分析结果, 本研究在 0~60  $\mu\text{mol/L}$   $\text{LaCl}_3$  浓度范围内建立了各酶和抗氧化物质与镧溶液浓度间的线性回归方程 (表 3), 以期为今后的研究提供参考。

表 3  $\text{LaCl}_3$  溶液浓度与小麦幼苗抗氧化酶活性及抗氧化物质含量间线性回归方程

自变量(X)	因变量(Y)	线性回归方程	$R^2$
$\text{LaCl}_3$ 浓度	MDA	$Y=-0.142X+22.964$	0.95
	$\text{H}_2\text{O}_2$	$Y=-0.053X+7.986$	0.98
	AsA	$Y=2.518X+273.709$	0.97
	SOD	$Y=-0.211X+85.286$	0.98
	APX	$Y=0.07X+0.244$	0.93
	GR	$Y=0.021X+2.114$	0.95

### 3 讨论与结论

大量研究表明, 铬胁迫会导致多种植物受到

过氧化伤害,影响其正常生长发育,进而影响产量<sup>[17-19]</sup>。本研究表明,铬胁迫会显著提高小麦幼苗中 $H_2O_2$ 和MDA含量,对小麦幼苗造成了氧化损伤,致使植株细胞膜系统遭受到破坏。周希琴等<sup>[20]</sup>研究表明,铬胁迫会显著降低玉米植株中AsA含量,这与本研究结果一致。AsA是植物体内重要的抗氧化物质,与GSH共同作用构成植物体内的非酶抗氧化体系AsA-GSH循环。本研究中铬胁迫导致小麦AsA含量降低,这可能是由于小麦自身消耗大量抗氧化物质用以对抗外界胁迫,导致体内AsA含量下降,这也是铬对小麦造成毒害的原因之一。田保华等<sup>[21]</sup>研究表明,铬胁迫会显著提升谷子叶片中SOD活性,这与本研究所得结论基本一致。本研究中小麦体内SOD活性升高说明小麦幼苗通过调动自身的抗氧化酶,来抵御外界铬胁迫对植株造成的伤害。此外,王碧霞<sup>[22]</sup>研究表明,铬胁迫会造成葎草叶片中CAT活性上升,这与本研究结果不一致,其原因可能是由于物种自身的抗氧化机制差异所致。另外,本研究发现重金属铬胁迫会造成小麦幼苗中APX活性显著降低,这可能与上文中提到的AsA含量降低有关。但这并不能解释GR活性升高的原因,有关铬胁迫与植物体内GR活性的相关报道较少,还有待今后进一步研究。本研究还发现,虽然铬胁迫下小麦幼苗中GSH含量有一定程度降低,但幅度较小,这与前文中AsA含量显著降低及GR活性显著上升的现象有一定分歧。这表明,在铬胁迫条件下,小麦幼苗在GSH代谢阶段可能存在较为复杂的抗氧化生理活动。

前人研究表明,镧能够显著减轻干旱<sup>[23]</sup>、低温<sup>[24]</sup>等不利环境因素及铜<sup>[25]</sup>、铅<sup>[5]</sup>等重金属对植物造成的氧化胁迫。管立凤等<sup>[23]</sup>研究表明,镧溶液能够提高水稻CAT的活性以减轻外界不良环境对植株造成的氧化胁迫,高永生等<sup>[26]</sup>研究表明,镧能够提高盐胁迫条件下小麦幼苗中AsA含量,减轻对植物的伤害。单长卷等<sup>[27]</sup>研究表明,镧溶液能够通过提升小麦幼苗中GR和APX活性进而减轻干旱条件对植株造成的损害。上述结论与本研究结果基本一致。但迄今为止,对镧调控铬胁迫下小麦幼苗抗氧化酶活性及抗氧化物质含量的相关研究仍属空白。本研究表明,通过镧溶液处理,铬胁迫下小麦幼苗中 $H_2O_2$ 和MDA含量显著降低,说明镧能够有效降低铬胁迫对小麦植株造成的损伤。此外,小麦幼苗中GR、APX等抗氧化酶的活性及AsA含量均得到显著提升,且均与镧溶

液浓度呈现显著相关性。说明镧主要通过调控上述酶活性和物质含量,从而强化小麦的抗氧化系统,协助植株抵御外界重金属铬的胁迫,进而减轻铬胁迫对植株造成的过氧化伤害。本研究还表明,中低浓度的 $LaCl_3$ 溶液能够对铬胁迫下小麦幼苗的抗氧化特性产生积极作用,但 $120\ \mu\text{mol/L}$   $LaCl_3$ 处理则会相对降低铬胁迫下小麦幼苗的抗氧化能力。因此在实际生产中,镧溶液的浓度不宜过高,以免造成效果下降或人畜中毒的情况。

综上所述,铬胁迫会对小麦幼苗造成氧化损害, $LaCl_3$ 溶液能够通过增强抗氧化酶活性及抗氧化物质的含量显著减轻重金属铬对小麦幼苗造成的不利影响。总体上以 $60\ \mu\text{mol/L}$   $LaCl_3$ 效果最佳,可以应用于实际生产中,以提升小麦抗铬胁迫的能力。

#### 参考文献:

- [1] 徐心诚. 铬胁迫对黄瓜种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 安徽农学通报, 2008, 14(7): 91-92.
- [2] 韩金龙, 王同燕, 徐子利, 等. 玉米抗旱机理及抗旱性鉴定指标研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(21): 142-146.
- [3] 宋相帝, 吕金印, 邸丽俊, 等. 铬胁迫对青菜 (*Brassica chinensis* L.) 植物螯合肽含量及抗氧化特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(5): 843-848.
- [4] 于晨曦, 王睿, 马曼茹, 等. 镧微肥对丹参产量和品质的影响[J]. 时珍国医国药, 2019, 30(11): 2730-2732.
- [5] 王起凡, 郭伟, 常青, 等. 不同浓度镧处理对铅胁迫下玉米生长和铅吸收的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(1): 480-487.
- [6] 庞春花, 张媛, 李亚妮. 硝酸镧浸种对藜麦种子萌发及盐胁迫下幼苗生长的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(24): 4484-4492.
- [7] 张超. 稀土镧和铈对东北大豆荚果干物质和氮积累的影响[J]. 农业科技通讯, 2019(10): 126-133.
- [8] 苏垒, 吴玺, 梁婵娟. 镧对酸雨胁迫下水稻叶片质膜 $H^+$ -ATPase活性的影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(1): 353-358.
- [9] 罗涵夫, 宋华伟, 刘天增, 等. 铝胁迫条件下镧对百喜草幼苗根系生长的影响[J]. 草业学报, 2017, 26(9): 208-213.
- [10] 阳妮, 蒋景龙, 李丽, 等. 3个柑橘品种幼苗对低温胁迫的生理响应及其抗寒性评价[J]. 中国果树, 2020(5): 32-39, 143.
- [11] Hodges D M, Andrews C J, Johnson D A, et al. Antioxidant compound responses to chilling stress in differentially sensitive inbred maize lines[J]. Plant Physiology, 1996, 98: 685-692.
- [12] 郭阿瑾, 杨凤玺, 王亚琴, 等. 不同光质LED对竹叶兰酚类物质及抗氧化性的影响[J]. 热带作物学报, 2018, 39(7): 1318-1323.

(下转第26页)

- [ 2 ] Marvel J N, Beyrouy C A, Gbur E E. Response of soybean growth to root and canopy competition[J]. *Crop Science*, 1992, 32(3): 797-801.
- [ 3 ] 王四清, 高聚林, 刘克礼, 等. 大豆花荚形成与花荚脱落的研究[J]. *内蒙古农业科技*, 2006(2): 8-10.
- [ 4 ] 金 剑, 刘晓冰, 王光华, 等. 大豆高产群体的生态生理特征[J]. *中国油料作物学报*, 2003, 25(3): 109-114.
- [ 5 ] 张 伟, 张惠君, 王海英, 等. 株行距和种植密度对高油大豆农艺性状及产量的影响[J]. *大豆科学*, 2006, 25(3): 283-287.
- [ 6 ] 韩 雪, 杨金剑, 齐照明. 种植密度对不同大豆品种产量性状的影响[J]. *汉斯农业科学*, 2021, 11(5): 417-430.
- [ 7 ] 刘玲雪, 贺海生, 徐明贵, 等. 半矮秆大豆北豆 25 窄行密植试验研究[J]. *农业科技通讯*, 2012(7): 88-90.
- [ 8 ] Cabal C, Martínez-García R, de Castro Aguilar A, et al. The exploitative segregation of plant roots[J]. *Science*, 2020, 370(6521): 1197-1199.
- [ 9 ] 黄 甜. 大垄三行下不同类型大豆品种产量及生理特征研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2020.
- [ 10 ] 苗保河. 大豆高产模式化栽培的研究进展[J]. *大豆通报*, 1997(4): 25-26.
- [ 11 ] 李瑞平, 李志刚, 王贵平, 等. 不同栽培模式对大豆生长动态及干物质积累分配的影响[J]. *大豆科学*, 2008, 27(6): 979-982.
- [ 12 ] 朱秀云, 梁 梦, 马 玉. 根系活力的测定(TTC 法)实验综述报告[J]. *广东化工*, 2020, 47(6): 211-212.
- [ 13 ] 王 英, 何语涵, 许晓敏, 等. 外源赤霉素对大豆矮秆品系 F<sub>03</sub> 生长发育的影响[J]. *东北农业科学*, 2019, 44(3): 1-4.
- [ 14 ] 肖亦农, 谢甫缙, 肖万欣. 不同肥密处理对超高产大豆氮素吸收和产量的影响[J]. *大豆科学*, 2011, 30(5): 769-776.
- [ 15 ] 任金涛, 张家新, 白盼盼, 等. 种植密度对膜下滴灌春大豆根系生长及产量的影响[J]. *大豆科学*, 2022, 41(6): 679-687.
- [ 16 ] 赵占营, 楚光红, 李思忠, 等. 栽培密度对高产大豆根系生长及花荚形成的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(5): 62-69.
- [ 17 ] 盖志佳. 氮肥密度互作对大豆产量影响的生理机制研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
- [ 18 ] 黄 甜, 黄俊霞, 闫晓艳, 等. 多效唑对繁茂度不同株型大豆产量及生理调控的影响[J]. *东北农业科学*, 2021, 46(3): 20-23, 33.
- [ 19 ] 涂心海, 牛 超. 夏大豆干物质生产、光合生理特性对群体调控的反应[J]. *陕西农业科学*, 2022, 68(4): 70-75.
- [ 20 ] 马兆惠, 车仁君, 王海英, 等. 种植密度和种植方式对超高产大豆根系形态和活力的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(6): 1084-1094.
- [ 21 ] 章建新, 李劲松. 窄行密植对高产春大豆根系生长的影响[J]. *大豆科学*, 2007, 26(4): 500-505.
- [ 22 ] 杜吉到, 蔡纯意. 不同密度下大豆根部性状的研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(4): 219-222.
- [ 23 ] 王 瑞, 朱文文, 马腾武, 等. 高产春大豆冠层光合物质生产及转运特性研究[J]. *东北农业科学*, 2023, 48(2): 13-17.
- [ 24 ] 于晓波, 梁建秋, 何泽明, 等. 株行距配置对大豆农艺性状和产量的影响[J]. *大豆科学*, 2021, 40(4): 482-489.

(责任编辑: 范杰英)

(上接第 19 页)

- [ 13 ] Griffith O W. Determination of glutathione and glutathione disulfide using glutathione reductase and 2-vinylpyridine[J]. *Analytical Biochemistry*, 1980, 106: 207-212.
- [ 14 ] 刘俊美, 单长卷. 硒对镉胁迫下玉米幼苗生理特性的影响[J]. *东北农业科学*, 2020, 45(3): 1-5.
- [ 15 ] Zheng C, Jiang D, Liu F, et al. Exogenous nitric oxide improves seed germination in wheat against mitochondrial oxidative damage induced by high salinity[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2009, 67(1): 222-227.
- [ 16 ] 曲 敏, 秦丽楠, 刘羽佳, 等. 两种检测 SOD 酶活性方法的比较[J]. *食品安全质量检测学报*, 2014, 5(10): 3318-3323.
- [ 17 ] 刘晓娟, 程 滨, 赵瑞芬, 等. 硒对镉胁迫下茄子生理特性及镉吸收的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(4): 357-363.
- [ 18 ] 刀静梅, 王思媛, 邓 军, 等. 镉、铅和铬胁迫在甘蔗伸长期积累特征[J]. *中国糖料*, 2019, 41(1): 19-22.
- [ 19 ] 汤 茜, 朱四喜, 赵 斌, 等. 湿地植物再力花对镉胁迫的生理生化响应[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(35): 108-115.
- [ 20 ] 周希琴, 吉前华. 镉胁迫对不同玉米品种种子萌发生理生态的影响[J]. *湖北农业科学*, 2005(4): 41-45.
- [ 21 ] 田保华, 张彦洁, 张丽萍, 等. 镉/铬胁迫对谷子幼苗生长和 NADPH 氧化酶及抗氧化酶体系的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(2): 240-246.
- [ 22 ] 王碧霞. NaCl 和 Cr<sup>3+</sup> 胁迫对藜草幼苗的生长及抗氧化酶活性的影响[J]. *天津农业科学*, 2017, 23(9): 1-6, 15.
- [ 23 ] 管利凤, 唐才宝, 曾红丽, 等. 外源氯化镉对干旱胁迫下水稻幼苗生长及生理特性的影响[J]. *激光生物学报*, 2019, 28(5): 468-474, 467.
- [ 24 ] 曹艳玲, 曹嘉雯, 裴红宾. 硝酸镉浸种对低磷胁迫下红小豆幼苗生长的影响[J]. *种子*, 2019, 38(5): 23-27.
- [ 25 ] 徐传婕, 许文峰, 施志鹏, 等. 镉、硒浸种对冬小麦种子萌发及铜胁迫下幼苗生长和生理的影响[J]. *天津农业科学*, 2019, 25(11): 7-11.
- [ 26 ] 高永生, 陈集双. 盐胁迫下镉对小麦幼苗叶片抗氧化系统活性的影响[J]. *中国稀土学报*, 2005(4): 490-495.
- [ 27 ] 单长卷, 李 滢, 赵元增, 等. 氯化镉对矮抗 58 幼苗叶片抗旱生理特性的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2014, 33(Z1): 99-102.

(责任编辑: 范杰英)