

硒对镉胁迫下玉米幼苗生理特性的影响

刘俊美¹, 单长卷^{2*}

(1. 鄢陵县农业技术推广中心, 河南 鄢陵 461200; 2. 河南科技学院, 河南 新乡 453003)

摘要:本文研究了镉胁迫下添加不同浓度亚硒酸钠(1、3、6、12 mg/L)对玉米幼苗 AsA-GSH 循环代谢酶活性、谷胱甘肽代谢酶活性、AsA 和 GSH 含量、抗坏血酸和谷胱甘肽氧化还原状态、叶绿素含量以及单株鲜重等指标的影响。结果表明, 镉胁迫显著降低了玉米幼苗 AsA-GSH 循环代谢酶 DHAR 和 APX 活性、谷胱甘肽代谢酶 γ -GCS 和 GST 活性、AsA 和 GSH 含量、GSH/GSSG、AsA/DHA、叶绿素含量和单株鲜重, 显著增加了 AsA-GSH 循环代谢酶 GR 和 MDHAR 活性以及 MDA 和 H_2O_2 含量。与镉单独处理相比, 添加不同浓度亚硒酸钠均显著提高了 AsA-GSH 循环代谢酶 DHAR、MDHAR 和 APX 活性、谷胱甘肽代谢酶 GPX 和 GST 活性、AsA 和 GSH 含量、GSH/GSSG、AsA/DHA、叶绿素含量和单株鲜重, 显著降低了 MDA 和 H_2O_2 含量。除 12 mg/L 亚硒酸钠对 GR 和 γ -GCS 活性无显著影响外, 其他浓度亚硒酸钠均显著增加了 GR 和 γ -GCS 活性。在所有亚硒酸钠处理浓度中, 3 mg/L 亚硒酸钠的处理效果最好。上述结果表明, 亚硒酸钠可以增强玉米幼苗的抗氧化能力, 从而增强玉米幼苗对镉胁迫的耐受性。

关键词:亚硒酸钠; 镉胁迫; 玉米幼苗; 抗氧化酶; 叶绿素

中图分类号: S513

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2020)03-0001-05

Effects of Selenium on Physiological Characteristics of Maize Seedlings under Cadmium Stress

LIU Junmei¹, SHAN Changjuan^{2*}

(1. Yanling Agricultural Technology Extension Center, Yanling 461200; 2. Henan Institute of Science and Technology, Xinxian 453003, China)

Abstract: The effects of different concentrations of sodium selenite (1, 3, 6, 12 mg/L) on the AsA-GSH circulatory metabolizing enzyme activity, glutathione metabolizing enzyme activity, the contents of AsA and GSH, the redox state of ascorbic acid and glutathione, chlorophyll and fresh biomass per plant of maize seedlings under cadmium (Cd) stress were studied. The results showed that Cd stress significantly reduced the activities of γ -GCS, GST, DHAR and APX, the contents of AsA and GSH, the ratio of GSH/GSSG and AsA/DHA, chlorophyll content and fresh biomass per plant of maize seedlings, compared with the control. However, Cd stress increased the activities of GR and MDHAR, as well as the contents of MDA and H_2O_2 of maize seedlings. Compared with Cd stress alone, the addition of sodium selenite at different concentrations significantly increased the activities of DHAR, MDHAR, APX, GPX and GST, the contents of AsA and GSH, the ratio of GSH/GSSG and AsA/DHA, chlorophyll content and fresh biomass per plant, but significantly reduced the contents of MDA and H_2O_2 . Except 12 mg/L sodium selenite had no significant effect on GR and γ -GCS activities, other concentrations of sodium selenite all significantly enhanced the activities of GR and γ -GCS. Among all the concentrations of sodium selenite, 3 mg/L sodium selenite had the best effects on above physiological characteristics. The results showed that sodium selenite could improve Cd tolerance of maize seedlings by enhancing the antioxidant properties.

Key words: Sodium selenite; Cadmium stress; Maize seedling; Antioxidant enzyme; Chlorophyll.

收稿日期: 2019-08-09

基金项目: 河南省重点研发与推广专项(科技攻关)(192102110130)

作者简介: 刘俊美(1966-), 女, 高级农艺师, 从事农艺与植保研究。

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

重金属胁迫严重影响作物的生长发育与产量,已报道的重金属有铅、铜和镉等^[1-3]。镉(Cd)是一种常见的有毒重金属,对各种生物体都存在潜在的危害^[3-4]。近年来,随着镉在冶金和金属加工等工业生产中的广泛应用,造成的环境和土壤污染也越来越严重。镉污染破坏土壤肥力,从而影响作物的生长发育和产量,导致农业经济受损。研究表明,镉在土壤中的不断积累会导致植物遗传物质发生损害和变异,破坏叶绿体的结构和功能,影响叶绿素的合成,进而影响植物的光合作用^[5]。镉胁迫还会诱导植物产生过氧化损伤,影响植物的生长和发育^[6]。因此,利用外源物质减轻镉胁迫对粮食作物造成的伤害具有十分重要的意义。有益元素硒在促进种子萌发、增加作物产量、改良作物品质和提高作物抗逆性等方面具有十分重要的作用^[7-9]。用适宜浓度的硒处理植物,可以增强植物对多种逆境的抗性,如干旱胁迫和盐胁迫等^[7-8,10]。适宜浓度的硒可以缓解镉对苧麻造成的过氧化伤害^[11]。到目前为止,硒对镉胁迫下玉米生理特性的影响未见报道。研究镉胁迫下不同浓度硒对玉米幼苗生理特性的影响,可以揭示硒缓解镉对玉米造成伤害的生理机制,具有一定的学术价值和应用价值。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用玉米品种为百玉1号。

1.2 培养与处理方法

挑选100颗籽粒饱满、大小均一的玉米种子用蒸馏水常温浸泡24 h。在培养皿里铺两层湿滤纸,将浸泡过的玉米种子转移至培养皿内,每皿平放20粒,加蒸馏水至玉米种子高度的一半。然后将装有玉米种子的培养皿放入光照培养箱中,白天温度为25℃,夜间温度为15℃,光照强度为500 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$,每天光照10 h。每天检查种子的发芽情况并隔天换水。当玉米幼苗长出两片叶子时,挑选出高度和长势基本一致的玉米幼苗用于试验。将玉米幼苗分别放入50、100、150、200 mg/L CdCl₂溶液中培养观察玉米幼苗植株的形态变化,培养5天后挑选出最适宜的镉处理浓度(对玉米幼苗造成伤害、又能体现植株重金属抗性的镉浓度)。

150 mg/L和200 mg/L CdCl₂处理的玉米幼苗出现明显的萎蔫状况,50 mg/L CdCl₂处理的玉米幼苗没有出现明显的萎蔫现象,100 mg/L CdCl₂处理的玉米幼苗叶片部分萎蔫,但仍能继续生长。因此,

选择100 mg/L CdCl₂作为最适镉处理浓度。为了研究硒对玉米幼苗耐镉性的影响,将玉米幼苗分为4组,分别用1、3、6、12 mg/L的亚硒酸钠进行预处理,处理时间为12 h。将上述玉米幼苗均置于100 mg/L CdCl₂溶液中培养6 d。对照组玉米幼苗仅用蒸馏水处理,单独镉胁迫处理仅用100 mg/L CdCl₂处理。处理6 d后,采集不同处理下玉米幼苗顶部充分展开的叶片,每株取样0.2 g叶片,每个处理取样3次。将样品置于-80℃冰箱,用于测定各项指标。

1.3 指标测定

1.3.1 酶活性的测定

抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性根据Nakano等^[12]的方法进行测定,将每分钟吸光值变化0.1定义为一个酶活力单位。谷胱甘肽还原酶(GR)采用Pignocchi C等^[13]的方法测定,将每分钟吸光值变化0.01定义为一个酶活力单位。单脱氢抗坏血酸还原酶(MDHAR)活性按照Jiménez A等^[14]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。脱氢抗坏血酸还原酶(DHAR)活性按照Chen Z等^[15]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。谷胱甘肽硫转移酶(GST)、谷胱甘肽过氧化物酶(GPX)和 γ -谷氨酰半胱氨酸合成酶(γ -GCS)均采用南京建成生物工程有限公司相应试剂盒进行测定。

1.3.2 GSH及GSH/GSSG测定

使用南京建成试剂盒分别测定GSH和GSSG含量,计算二者的比值,即为GSH/GSSG。

1.3.3 AsA及AsA/DHA测定

使用索莱宝试剂盒分别测定AsA和DHA含量,计算二者的比值,即为AsA/DHA。

1.3.4 MDA和H₂O₂含量测定

采用硫代巴比妥(TBA)显色法测定丙二醛(MDA)含量^[16]。H₂O₂含量采用南京建成生物工程有限公司相应试剂盒进行测定。

1.3.5 叶绿素含量和单株鲜重测定

采用丙酮比色法测定叶绿素含量^[17]。处理6天以后,利用感量0.01 g的电子天平称重并记录不同处理下玉米幼苗单株的鲜重。

1.4 数据统计分析

结果取3次重复的平均值,平均值之间通过方差分析和多重比较在 $\alpha=5\%$ 水平上进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 硒对镉胁迫下玉米幼苗AsA-GSH循环代谢酶活性的影响

如表1所示,与对照组相比,镉胁迫显著提高了GR和MDHAR活性,降低了DHAR和APX活性。与镉单独处理相比,1、3、6、12 mg/L Na_2SeO_3 处理显著提高了镉胁迫下DHAR、MDHAR和APX活性;除12 mg/L Na_2SeO_3 处理外,其他浓度 Na_2SeO_3 显著提高了GR活性。1、3、6、12 mg/L Na_2SeO_3 使GR活性分别提高了38.7%、83.9%、

38.7%、9.7%,使DHAR活性分别提高了51.3%、121.4%、57.3%、64.9%,使MDHAR活性分别提高了41.2%、97.1%、69.1%、19.1%,使APX活性分别提高了158.3%、178.3%、100.0%、25.0%。以上结果表明,不同浓度的 Na_2SeO_3 可以增强玉米幼苗叶片AsA-GSH循环代谢酶APX、GR、DHAR和MDHAR活性,3 mg/L Na_2SeO_3 处理作用最为显著。

表1 硒对镉胁迫下玉米幼苗AsA-GSH循环代谢酶活性的影响

U/g·FW

处理	GR	DHAR	MDHAR	APX
对照	0.11±0.01d	1.61±0.18c	0.29±0.11e	1.16±0.13b
Cd	0.31±0.03c	1.17±0.17d	0.68±0.17d	0.60±0.08d
1 mg/L Na_2SeO_3 +Cd	0.43±0.06b	1.77±0.22b	0.96±0.22b	1.55±0.16a
3 mg/L Na_2SeO_3 +Cd	0.57±0.05a	2.59±0.24a	1.34±0.19a	1.67±0.24a
6 mg/L Na_2SeO_3 +Cd	0.43±0.04b	1.84±0.19b	1.15±0.14a	1.20±0.15b
12 mg/L Na_2SeO_3 +Cd	0.34±0.11c	1.93±0.16b	0.81±0.09c	0.75±0.11c

注:表中同一列中小写字母不同表示不同处理在 $\alpha=0.05$ 水平上差异显著,下同

2.2 硒对镉胁迫下玉米幼苗谷胱甘肽代谢相关酶的影响

如表2所示,与对照组相比,镉胁迫显著降低了 γ -GCS和GST的活性,但对GPX无显著影响。与镉单独处理相比,1、3、6、12 mg/L Na_2SeO_3 显著提高了镉胁迫下GST和GPX活性;除12 mg/L Na_2SeO_3 预处理外,其他浓度 Na_2SeO_3 显著提高了 γ -GCS活性。1、3、6、12 mg/L Na_2SeO_3 使GST活性分别增加了11.1%、24.2%、14.9%、10.4%,使GPX活性分别增加了72.1%、88.5%、86.8%、77.0%,使 γ -GCS活性分别增加了50.0%、76.7%、19.2%、8.3%。上述结果表明,不同浓度的 Na_2SeO_3 处理均可以增强玉米幼苗叶片谷胱甘肽代谢酶 γ -GCS、GST和GPX活性,3 mg/L Na_2SeO_3 处理作用最为显著。

表2 硒对镉胁迫下玉米幼苗谷胱甘肽代谢相关酶活性的影响

U/g·FW

处理	γ -GCS	GPX	GST
对照	1.60±0.15c	0.65±0.06b	3.26±0.32a
Cd	1.20±0.13d	0.61±0.07b	2.89±0.33b
1 mg/L Na_2SeO_3 +Cd	1.80±0.16b	1.05±0.12a	3.21±0.32a
3 mg/L Na_2SeO_3 +Cd	2.12±0.22a	1.15±0.12a	3.59±0.33a
6 mg/L Na_2SeO_3 +Cd	1.43±0.16c	1.14±0.20a	3.32±0.42a
12 mg/L Na_2SeO_3 +Cd	1.30±0.13d	1.08±0.14a	3.19±0.31a

2.3 硒对镉胁迫下玉米幼苗GSH和AsA含量及其二者氧化还原状态的影响

如表3所示,与对照组相比,镉胁迫导致AsA和GSH含量及GSH/GSSG和AsA/DHA均显著降

低。1、3、6、12 mg/L Na_2SeO_3 处理显著提高了玉米幼苗叶片AsA和GSH含量及GSH/GSSG和AsA/DHA。与镉单独处理相比,1、3、6、12 mg/L Na_2SeO_3 使AsA含量分别增加了47.7%、60.5%、53.2%、35.5%,使GSH含量分别增加了22.0%、40.0%、30.0%、16.0%,使GSH/GSSG分别增加了20.0%、29.7%、20.0%、10.8%,使AsA/DHA分别增加了16.7%、22.2%、16.1%、10.0%。以上结果表明,不同浓度的 Na_2SeO_3 均可以提高玉米幼苗叶片AsA和GSH含量及GSH/GSSG和AsA/DHA,3 mg/L Na_2SeO_3 处理作用最为显著。

2.4 硒对镉胁迫下玉米幼苗MDA和 H_2O_2 含量、叶绿素含量及单株鲜重的影响

如表4所示,与对照组相比,镉胁迫显著提高了玉米幼苗叶片MDA和 H_2O_2 含量,显著降低了叶绿素含量和玉米幼苗单株鲜重。与镉胁迫单独处理相比,1、3、6、12 mg/L Na_2SeO_3 预处理显著降低了镉胁迫下MDA和 H_2O_2 含量,显著提高了镉胁迫下叶绿素含量和玉米幼苗单株鲜重。1、3、6、12 mg/L Na_2SeO_3 使MDA含量分别减少了37.5%、50.0%、27.1%、18.8%,使 H_2O_2 含量分别减少了22.4%、39.7%、22.4%、16.4%,使叶绿素含量分别增加了46.7%、70.0%、33.3%、20.0%,使玉米幼苗单株鲜重分别增加了17.9%、33.5%、18.8%、10.9%。以上结果表明,不同浓度的 Na_2SeO_3 均可以降低玉米幼苗叶片MDA和 H_2O_2 含量,提高玉米幼苗植株的叶绿素含量和单株鲜重,3 mg/L Na_2SeO_3 处理作用最为显著。

表 3 硒对镉胁迫下玉米幼苗 AsA 和 GSH 含量、GSH/GSSG 和 AsA/DHA 的影响

处理	GSH ($\mu\text{mol/g} \cdot \text{FW}$)	GSH/GSSG	AsA ($\mu\text{mol/g} \cdot \text{FW}$)	AsA/DHA
对照	0.85±0.07a	26.5±2.36a	2.91±0.25b	24.9±2.70a
Cd	0.50±0.06d	18.5±2.01d	2.20±0.31c	18.0±1.58c
1 mg/LNa ₂ SeO ₃ +Cd	0.61±0.06c	22.2±2.17b	3.25±0.38a	21.0±1.90b
3 mg/LNa ₂ SeO ₃ +Cd	0.70±0.08b	24.0±2.30b	3.53±0.57a	22.0±2.44b
6 mg/LNa ₂ SeO ₃ +Cd	0.65±0.08bc	22.0±2.00b	3.37±0.63a	20.9±2.30b
12 mg/LNa ₂ SeO ₃ +Cd	0.58±0.05c	20.5±1.89c	2.98±0.39b	19.8±1.73b

表 4 硒对镉胁迫下玉米幼苗 MDA 和 H₂O₂ 含量、叶绿素含量及单株鲜重的影响

处理	MDA 含量 (nmol/g)	H ₂ O ₂ 含量 (mmol/g)	叶绿素含量 (mg/g·FW)	鲜重(g/株)
对照	4.0±0.38e	0.55±0.06d	2.21±0.27c	21.85±0.16a
Cd	9.6±0.90a	1.16±0.14a	1.50±0.24d	14.11±0.16d
1 mg/LNa ₂ SeO ₃ +Cd	6.0±0.66c	0.90±0.10b	2.20±0.41a	16.64±0.12c
3 mg/LNa ₂ SeO ₃ +Cd	4.8±0.44d	0.70±0.08c	2.55±0.27b	18.84±0.18b
6 mg/LNa ₂ SeO ₃ +Cd	7.0±0.75b	0.90±0.11b	2.00±0.31c	16.76±0.11c
12 mg/LNa ₂ SeO ₃ +Cd	7.8±0.80b	0.97±0.13b	1.80±0.22c	15.65±0.12c

3 讨 论

研究表明,镉会对植物造成过氧化伤害^[3]。本研究发现,镉胁迫下玉米幼苗 MDA 和 H₂O₂ 含量显著升高,表明镉胁迫导致玉米幼苗植株的脂质过氧化水平增加,对玉米植株造成了过氧化伤害。与单独镉胁迫处理相比,Na₂SeO₃ 预处理显著降低了镉胁迫下玉米幼苗叶片 MDA 和 H₂O₂ 含量。说明外源 Na₂SeO₃ 处理可以缓解镉对玉米幼苗植株造成的过氧化伤害。

AsA-GSH 循环是植物体内抗氧化系统的重要组成部分,在植物响应镉胁迫中发挥了重要作用。芮海云等研究表明,箭舌豌豆根系可以通过增强 AsA-GSH 循环代谢酶 APX 和 DHAR 而增强抗镉性^[18]。杨卫东等研究表明,旱柳幼苗可以通过增强 AsA-GSH 循环代谢酶 MDHAR、GR、DHAR 和 APX 活性而提高抗镉性^[19]。曲丹阳等研究发现,镉胁迫导致郑单 958 玉米幼苗 AsA-GSH 循环代谢酶 GR 和 DHAR 活性降低,导致 MDHAR 活性显著增强,但对 APX 活性影响不显著^[20]。本研究表明,镉胁迫导致百玉 1 号玉米幼苗 AsA-GSH 循环代谢酶 DHAR 活性降低和 MDHAR 活性升高,这与曲丹阳等的研究结果一致。镉胁迫导致百玉 1 号玉米幼苗 AsA-GSH 循环代谢酶 APX 活性降低和 GR 活性升高,这与曲丹阳等的研究结果不一致^[20]。综上可知,不同植物的 AsA-GSH 循环代谢酶活性对镉胁迫的响应均存在一定差异;玉米品种不同,其 AsA-GSH 循环代谢酶活性对镉胁迫的

响应也不一致。这说明植物 AsA-GSH 循环代谢酶对镉胁迫响应的差异与物种和品种有关。

在植物体内,谷胱甘肽(GSH)代谢相关酶 GST、GPX 和 γ -GCS 在响应逆境胁迫中也发挥了重要作用。杨卫东等研究表明,镉胁迫显著增加了旱柳幼苗叶片 GSH 含量及 GSH 代谢相关酶 GR、GST 和 GPX 活性,从而提高了其耐镉性^[19]。本研究表明,镉胁迫显著降低了 GST 活性,对 GPX 活性无显著影响,这与杨卫东等的研究结果不一致。究其原因,可能与植物种类有关。镉胁迫显著降低了 GSH 合成关键酶 γ -GCS 活性,从而降低了 GSH 含量。曲丹阳等研究表明,镉胁迫导致郑单 958 玉米幼苗 AsA 和 GSH 含量及 AsA/DHA 和 GSH/GSSG 比值均显著下降^[20]。本研究发现,镉胁迫导致百玉 1 号玉米幼苗 AsA 和 GSH 含量及 AsA/DHA 和 GSH/GSSG 比值均显著下降,这与曲丹阳等的研究结果一致。鉴于 AsA 和 GSH 含量及 AsA/DHA 和 GSH/GSSG 是衡量植物细胞氧化还原状态的重要指标,上述研究结果说明镉胁迫破坏了玉米幼苗植株的氧化还原平衡。

研究表明:硒可以提高植物体内的众多抗氧化酶的活性,从而缓解多种环境胁迫对植物造成的过氧化伤害^[9-10]。张庆等研究表明,硒可以显著增强茶树抗氧化酶 APX 和 GPX 活性,从而增强其抗镉性^[21]。本研究表明,硒可以显著增加玉米幼苗 APX 和 GPX 活性,这与张庆等的研究结果一致。本研究发现,硒可以显著增加玉米幼苗抗氧化酶 GR、DHAR、MDHAR 和 GST 活性,进而增强

其抗镉性。代邹等研究表明, 硒可以显著增加水稻幼苗抗氧化物质 AsA 和 GSH 含量, 从而增强其抗镉性^[22]。本研究表明, 硒可以显著增加玉米幼苗抗氧化物质 AsA 和 GSH 含量。硒可以显著提高 AsA/DHA 和 GSH/GSSG, 从而缓解镉胁迫对玉米幼苗植株氧化还原平衡的破坏。硒可以提高 GSH 合成关键酶 γ -GCS 活性, 从而有利于 GSH 含量和 GSH/GSSG 的升高。

由于逆境造成的过氧化伤害会导致叶绿素降解, 故叶绿素含量的高低和植株抗氧化能力强弱具有密切关系。杨卫东等研究表明, 镉胁迫导致旱柳幼苗叶绿素含量显著下降^[19]。本研究发现, 镉胁迫显著降低了玉米幼苗叶绿素含量。代邹等研究表明, 硒可以显著增加镉胁迫下水稻幼苗叶绿素含量, 从而促进光合作用, 提高了生物量^[22]。本研究表明, 硒可以显著提高镉胁迫下玉米幼苗叶绿素含量, 从而提高单株鲜重。硒可以通过增强玉米幼苗植株的抗氧化能力, 从而减轻镉对光合色素叶绿素的破坏, 提高了镉胁迫下玉米幼苗的生物量。

综上所述, 外源添加硒可以提高玉米幼苗 AsA-GSH 循环代谢酶和谷胱甘肽代谢相关酶活性、抗氧化物质 AsA 和 GSH 含量以及 AsA/DHA 和 GSH/GSSG, 从而增强植株抗氧化能力, 降低镉胁迫对光合色素的破坏, 维持植株的生长, 进而增强抗镉性。本研究的结果可以为外源硒在植物抗镉栽培中的应用提供理论依据。

参考文献:

- [1] 周娜娜, 武耀廷, 高华援, 等. 铜胁迫对花生幼苗生长及生理代谢的影响[J]. 东北农业科学, 2019, 44(6): 6-9.
- [2] 毛雪飞, 何金娇, 韩忠康, 等. 铅胁迫对金银花生长期及积累特性的影响[J]. 东北农业科学, 2019, 44(5): 69-75, 87.
- [3] 马晓丽, 冀瑞萍, 田保华, 等. 一氧化氮(NO)对镉胁迫下小麦幼苗氧化损伤的影响[J]. 生物技术通报, 2017, 33(5): 102-107.
- [4] 张义贤. 重金属对大麦毒性的研究[J]. 环境科学学报, 1997, 12(20): 21-25.
- [5] 唐星林, 金洪平, 周 晨, 等. 镉胁迫对龙葵叶绿素荧光和光合生化特性的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(9): 102-108.
- [6] 孙天国, 孙玉斌. 外源亚精胺对镉胁迫下玉米幼苗抗氧化代谢的调控效应[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(16): 103-105.
- [7] 周进财, 曹艳玲, 刘凤兰. 外源硒浸种对油菜幼苗根系生长及生理特性的影响[J]. 种子, 2019, 38(10): 107-109, 118.
- [8] 蒋方山, 张海军, 吕连杰, 等. 叶面喷施亚硒酸钠对黑粒小麦籽粒硒含量、产量及品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(12): 1496-1503.
- [9] 兰 敏, 尹美强, 芦文杰, 等. 干旱胁迫下外源硒对小麦幼苗抗旱性的影响[J]. 土壤, 2018, 50(6): 1182-1189.
- [10] 单长卷, 付远志, 彭贝贝. 盐胁迫下谷胱甘肽对玉米幼苗根系抗氧化能力的影响[J]. 灌溉排水学报, 2015, 12(10): 91-95.
- [11] 汤 慧, 刘 妍. 外源硒和硅对镉胁迫下苎麻生理响应的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- [12] Nakano Y, Asada K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate specific peroxidase in spinach chloroplasts[J]. Plant Cell & Physiology, 1981, 22(5): 867-880.
- [13] Pignocchi C, Kiddle G, Hernandez I, et al. Ascorbate oxidase-dependent changes in the redox state of the apoplast modulate gene transcript accumulation leading to modified hormone signaling and orchestration of defense processes in tobacco[J]. Plant Physiology, 2006, 141(2): 423-435.
- [14] Jiménez A, Hernández J A, Delrio L A, et al. Evidence for the presence of the ascorbate-glutathione cycle in mitochondria and peroxisomes of pea leaves[J]. Plant Physiology, 1997, 114(1): 275-284.
- [15] Chen Z, Young T E, Ling J, et al. Increasing vitamin C content of plants through enhanced ascorbate recycling[J]. Plant Biology, 2003, 100(6): 3525-3530.
- [16] Heath R L, Packer L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation[J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 1968, 125(1): 189-198.
- [17] 苏秀荣, 王秀峰, 丁方军, 等. 不同浓度的 NO_3^- 对黄瓜幼苗光合特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(6): 1110-1117.
- [18] 芮海云, 张兴兴, 庄 凯, 等. 箭舌豌豆根系抗坏血酸及相关酶对镉胁迫的响应[J]. 西北植物学报, 2016, 36(7): 1391-1398.
- [19] 杨卫东, 李廷强, 丁哲利, 等. 旱柳幼苗抗坏血酸-谷胱甘肽循环及谷胱甘肽代谢对镉胁迫的响应[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2014, 40(5): 551-558.
- [20] 曲丹阳, 顾万荣, 李丽杰, 等. 壳聚糖对镉胁迫下玉米幼苗叶片 AsA-GSH 循环的调控效应[J]. 植物科学学报, 2018, 36(2): 291-299.
- [21] 张 庆, 魏树和, 代惠萍, 等. 硒对茶树镉毒害的缓解作用研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(1): 200-204.
- [22] 代 邹, 王春雨, 李 娜, 等. 硒对不同水稻幼苗镉胁迫的缓解作用及其对矿质营养的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2016, 42(6): 720-730.

(责任编辑: 刘洪霞)