



野生和栽培大豆对镉胁迫的响应差异分析

冯君¹, 赵毅², 高婷¹, 张韞璐¹, 马莲菊¹, 谢甫缙², 于翠梅²

(1. 沈阳师范大学 生命科学学院, 辽宁 沈阳 110034; 2. 沈阳农业大学 农学院, 辽宁 沈阳 110866)

摘要:为探明野生大豆和栽培大豆对不同浓度镉胁迫的响应差异, 筛选大豆耐镉优质资源。以辽豆 24 和野生大豆 1502 为材料, 采取不同镉浓度处理(0, 20, 40, 80 mg·kg⁻¹), 以不添加镉为对照, 分别在处理 20, 30 和 40 d 时, 测定株高、抗氧化酶(SOD、POD、CAT)活性及 MDA 含量。结果表明两种大豆均表现出随镉浓度的增加而株高逐渐降低的趋势, 40 和 80 mg·kg⁻¹处理组显著低于对照, 且随着处理时间延长, 高浓度镉下株高降低幅度增大。镉胁迫对栽培大豆株高的抑制作用较野生大豆表现得更早, 更明显。镉胁迫对栽培和野生大豆的 SOD、POD 和 CAT 活性及 MDA 含量都有一定影响, 但是两种大豆间差异很大。不同浓度镉胁迫下, SOD 和 POD 活性变化较 CAT 活性变化表现得更灵敏; 栽培大豆的 3 种抗氧化酶较野生大豆活性变化幅度更大, 高镉浓度抑制效应更明显; 栽培大豆较野生大豆的 MDA 含量增加效应出现得更早更明显。野生大豆与栽培大豆相比, 对重金属镉的耐受性更强, 可以作为重要的遗传资源应用于大豆的抗镉育种。

关键词:栽培大豆; 野生大豆; 镉胁迫; 生理反应

The Difference of Responses to the Cadmium Stress Between a Wild Soybean and a Cultivated Soybean

FENG Jun¹, ZHAO Yi², GAO Ting¹, ZHANG Yun-lu¹, MA Lian-ju¹, XIE Fu-ti², YU Cui-mei²

(1. College of Life Science, Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China; 2. College of Agronomy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: In order to screen the cadmium-tolerant soybean resources, the different responses of the wild and the cultivated soybean to cadmium stress were studied. Taking a cultivated soybean Liaodou 24 and a wild soybean (*Glycine soja*) 1502 as the research materials, plant height, protective enzyme activity (SOD, POD, CAT), malondialdehyde (MDA) content were investigated under treatments with different cadmium concentrations (0, 20, 40, 80 mg·kg⁻¹) and different treatment times (20, 30, 40 d). The results showed that with more treatment concentrations and more time, plant height of both the cultivated soybean and the wild soybean seedlings were lower than the control. When the cadmium concentration was 40 and 80 mg·kg⁻¹, treatments were significantly lower than that of the control. The effect of reducing plant height in the cultivated soybean was earlier and more obvious than that in the wild soybean. There was greater difference in SOD, POD, CAT activity and MDA content to the cadmium stress between the wild soybean and the cultivated soybean. The changes of SOD and POD activity were more sensitive than that of CAT. Three enzyme activities of the cultivated soybean were more varied and more obvious inhibition effect at high concentrations compared with the wild soybean. The effect of increasing MDA content in the cultivated soybean was earlier and more obvious than that in the wild soybean. Compared with the cultivated soybean, the wild soybean are more tolerant to heavy metal cadmium, which can be used as an important genetic resource in anti-cadmium breeding of soybeans.

Keywords: Cultivated soybean; Wild soybean; Cadmium stress; Physiological response

重金属中镉(Cd)是对生物影响较强的元素之一, 其不但对植物具有巨大的毒害作用, 而且在植物器官中积累会通过食物链传递到人体, 并在人体的肾脏和肝脏中被有效地保留, 从而对人体产生很大的毒害^[1-2]。镉胁迫导致植物体内产生过多的活性氧自由基(ROS), 对质膜结构具有强烈的破坏作用, 丙二醛(MDA)含量的增加往往成为膜脂过氧化

和脱脂化的重要标志。相应的植物体内抗氧化酶类, 如超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)等会提高活性以清除这些有毒物质来保护质膜系统^[3]。大豆是镉敏感作物, 镉污染土壤中生长的大豆在多种农艺性状上都表现出的显著差异^[4-5]。研究表明大豆体内镉含量过多会表现出植株矮小、叶片失绿、根系生长迟缓、根系

收稿日期: 2018-06-25

基金项目: 辽宁省科技厅项目(2015020762); 辽宁省教育厅项目(L2015490)。

第一作者简介: 冯君(1996-), 女, 硕士, 主要从事生物化学与分子生物学研究。E-mail: 7913064035@qq.com。

通讯作者: 于翠梅(1974-), 女, 博士, 副教授, 主要从事大豆遗传育种及抗镉育种研究。E-mail: yucui mei@163.com。

活力下降、产量降低等不良症状^[6-8]。对大豆镉胁迫研究也发现 SOD、POD 和 CAT 等酶活及 MDA 含量会有很大变化,但是在不同基因型、不同处理浓度及不同处理时间等条件下变化并不一致^[9],表现出植物对 Cd 胁迫应答机制的差异性。野生大豆在营养和抗逆性等方面优于栽培大豆,是栽培大豆的优良基因源,对解决大豆抗逆育种中遗传基因狭窄等问题具有重要意义^[10]。目前对野生大豆在耐镉方面研究还很少。本研究利用不同镉浓度处理,分析栽培大豆和野生大豆镉胁迫下的响应差异,从植株形态和理化响应两个方面分析二者对镉胁迫的耐受差异,以期为大豆抗镉育种提供遗传资源,为大豆耐镉机理研究奠定理论基础。

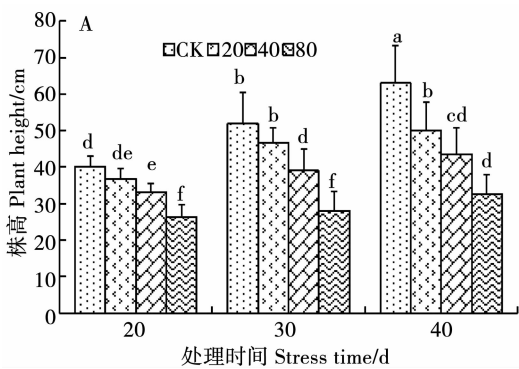
1 材料与方法

1.1 材料

供试材料为辽豆 24 和野生大豆 1502,由沈阳农业大学大豆研究所提供。

1.2 试验设计

将草炭土与沙土 1:1 混合均匀后装盆(直径为 11.5 cm 的聚乙烯盆中),每盆装土 0.5 kg,分别进行浓度为 20,40,80 mg·kg⁻¹ 的镉处理,以不添加镉为对照。每处理重复 3 次。选取颗粒饱满、大小均匀的大豆种子用次氯酸钠溶液进行浸泡消毒,用蒸馏水洗净,然后播于土壤中,每盆土壤播种 10 粒,于播种后 20,30,40 d 进行相关指标测定。



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。
Different lowercase means significant difference among treatments ($P < 0.05$). The same below.

图 1 镉胁迫对栽培大豆(A)和野生大豆(B)株高的影响

Fig. 1 Effects of Cd stress on plant height of cultivated soybean and wild soybean

2.2 大豆幼苗 SOD 活性对镉胁迫的响应

镉胁迫对两种大豆 SOD 活性都有一定影响,但不同镉处理浓度和不同处理时间,两种大豆 SOD 活性变化趋势不同(图 2)。栽培大豆在处理 20 d 时镉胁迫影响最大,随着镉浓度增加,SOD 活性不断下降,且不同浓度间 SOD 活性差异显著,80 mg·kg⁻¹ 时下降幅达 56.7%。镉胁迫处理 30 和 40 d 时,不

1.3 测定项目与方法

株高测定,每种处理取 9 株,取平均值。SOD 活性测定采用抑制氮蓝四唑(NBT)光化还原法;POD 活性测定采用愈创木酚法;CAT 活性测定采用比色法;丙二醛含量测定采用硫代巴比妥酸(TAB)比色法^[11]。

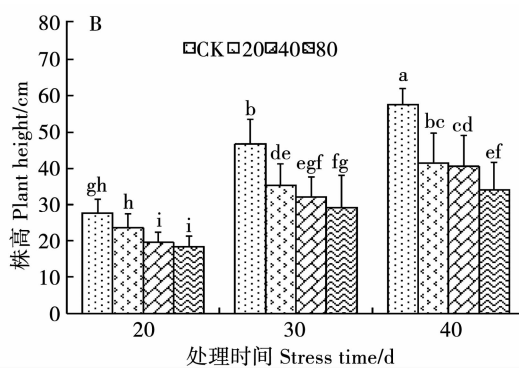
1.4 数据处理

采用 SPSS 13.0 和 Excel 2007 软件进行数据处理,通过方差分析(ANOVA)和 LSD 检测,比较其差异显著性。

2 结果与分析

2.1 株高对镉胁迫的响应

两个品种大豆在镉胁迫下的株高变化趋势基本相同(图 1)。随镉浓度的增加,栽培大豆和野生大豆幼苗均表现为逐渐降低的趋势。40 和 80 mg·kg⁻¹ 处理组的栽培大豆和野生大豆幼苗株高显著低于对照,随镉浓度的增加,株高降低幅度增大。在不同处理时间方面,两种大豆随着培养时间延长,株高有不同程度的增加,但是增幅表现出一定的差异。在 80 mg·kg⁻¹ 的镉浓度胁迫下,栽培大豆在处理 20~30 d 株高生长被抑制明显,增幅只有 6.4%,而对照增幅达 29.3%;野生大豆在处理 20~30 d 株高显著增加,增幅为 57.9%,对照增幅为 68.6%。这说明栽培大豆的株高较野生大豆对镉胁迫的抑制表现得更早,更明显。



同浓度处理对 SOD 活性影响不大,处理组 and 对照间差异不显著。野生大豆在处理 20 d 时镉胁迫对 SOD 活性影响最小,不同浓度处理间差异不显著。处理 30 和 40 d 时,镉胁迫对 SOD 活性的影响才有表现,30 d 时,80 mg·kg⁻¹ 处理 SOD 活性显著高于对照,其它处理间差异不显著;40 d 时,80 mg·kg⁻¹ 处理 SOD 活性显著低于对照,较对照降低 12.2%,

其它处理和对照间差异不显著。胁迫早期就明显被抑制,而且镉浓度越大,抑制作用越明显,野生大豆的 SOD 活性只有在 80 mg·kg⁻¹ 的高浓度镉处理

40 d 时才有较明显的抑制作用,这说明栽培大豆较野生大豆 SOD 活性对镉胁迫更敏感。

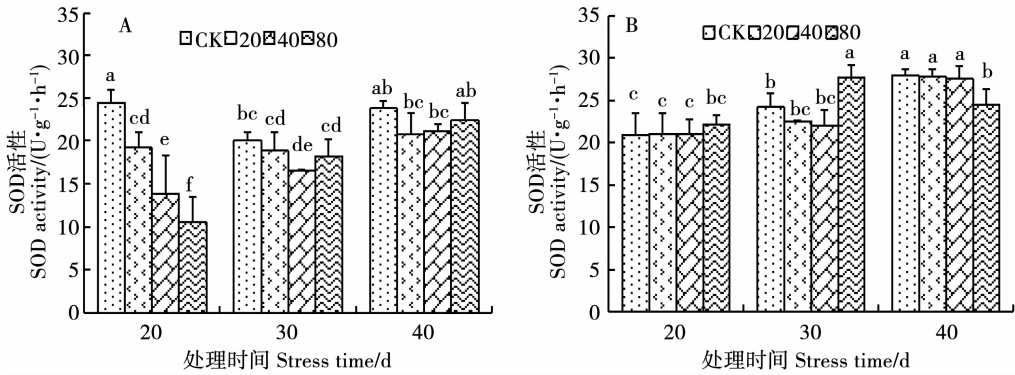


图 2 镉胁迫对栽培大豆 (A) 和野生大豆 (B) SOD 活性的影响

Fig. 2 Effects of Cd stress on the activities of SOD of cultivated soybean and wild soybean

2.3 幼苗 POD 活性对镉胁迫的响应

两种大豆 POD 活性变化趋势在不同镉处理浓度和处理时间上存在一定差异 (图 3)。在 20 d 时,两种大豆 POD 活性在不同处理浓度间变化很大,栽培大豆表现为中低镉浓度 (20 和 40 mg·kg⁻¹) POD 活性增加,高浓度 (80 mg·kg⁻¹) 处理降低,降幅达 36.4%。野生大豆表现为中低浓度促进,高浓度与对照差异不明显。处理到 30 d 时,野生大豆在高浓

度镉胁迫下才有抑制效果,POD 活性降幅为 22.2%,而栽培大豆在处理 30 d 时,高浓度 POD 活性降幅 36.5%,抑制效果更明显。到处理 40 d 时,栽培大豆在不同处理浓度下 POD 活性均表现为升高趋势,高浓度处理显著高于对照;野生大豆在不同处理浓度下 POD 活性也有升高趋势,但并没有达到显著水平。总体上栽培大豆的 POD 活性对镉胁迫反应更大,尤其高浓度早期的抑制效果更明显。

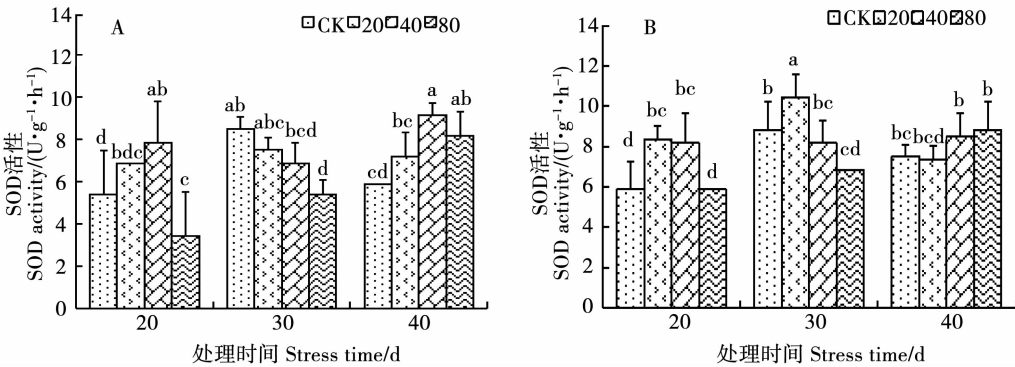


图 3 镉胁迫对栽培大豆 (A) 和野生大豆 (B) POD 活性的影响

Fig. 3 Effects of Cd stress on the activities of POD of cultivated soybean and wild soybean

2.4 幼苗 CAT 活性对镉胁迫的响应

栽培大豆在处理 30 d 时,只有高浓度下 CAT 活性显著低于对照,其它浓度与对照差异不显著,到 40 d 时,所有浓度处理的 CAT 活性显著低于对照,高浓度处理的 CAT 活性最低,降幅达 57.1% (图 4)。野生大豆也是处理 30 d 才表现出差异,不同处理浓度差异不显著,均低于对照,高浓度处理降幅为 28.6%。到 40 d 时,不同浓度处理和对照没有显著差异。总体上镉胁迫对栽培大豆 CAT 活性影响更大,尤其是高浓度的抑制作用更强,野生大豆 CAT 活性在不同处理浓度间差异不显著。

2.5 幼苗 MDA 含量对镉胁迫的响应

镉胁迫对两种大豆的 MDA 含量有很大影响 (图 5)。栽培大豆表现出随着镉浓度升高,MDA 含量有增加趋势,在 40 和 80 mg·kg⁻¹ 浓度下 MDA 含量显著高于对照;20 mg·kg⁻¹ 浓度下,在处理到 40 d 时,MDA 含量也逐渐增加到显著高于对照的水平。野生大豆在 20 mg·kg⁻¹ 浓度下,处理组与对照差异不显著;40 mg·kg⁻¹ 浓度下,处理 20 和 30 d 时 MDA 含量显著低于对照,到 40 d 时显著高于对照;80 mg·kg⁻¹ 浓度下,处理 20 d 时 MDA 含量显著低于对照,30 和 40 d 时 MDA 含量逐渐增加,但是与对照没有达到显著差异水平。

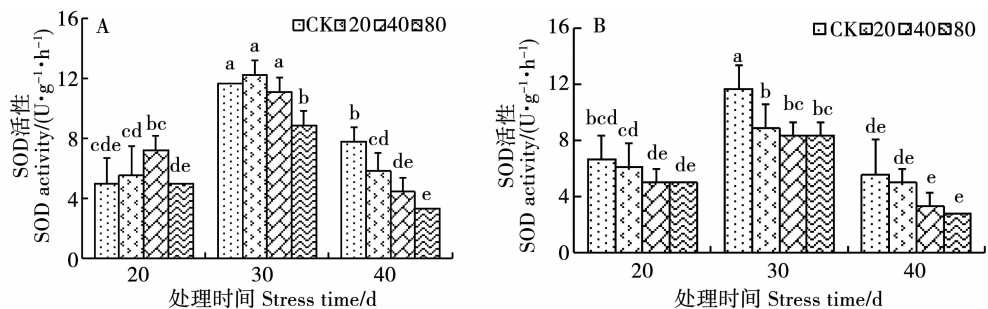


图 4 镉胁迫对栽培大豆 (A) 和野生大豆 (B) CAT 活性的影响

Fig. 4 Effects of Cd stress on the activities of CAT of cultivated soybean and wild soybean

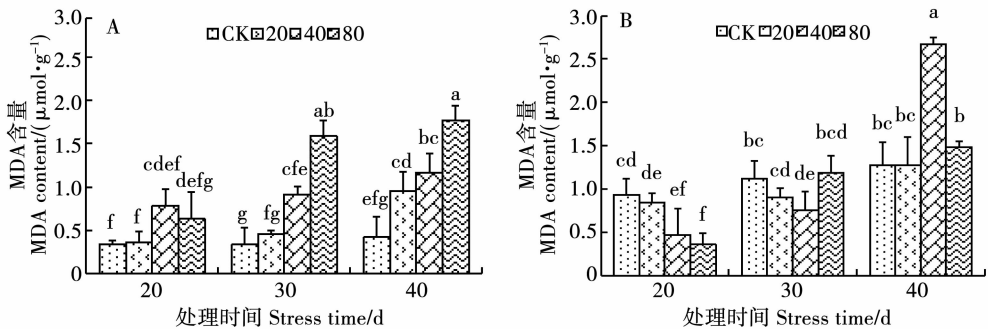


图 5 镉胁迫对栽培大豆 (A) 和野生大豆 (B) MDA 含量的影响

Fig. 5 Effects of Cd stress on MDA content of cultivated soybean and wild soybean

3 讨 论

3.1 镉对植株生长的影响

镉是植物的一种非必需元素,研究表明镉对植物生长发育存在一定的剂量效应,在一定浓度范围内镉能促进某些植物的生长,但是随着镉浓度的升高,逐渐对植物的生长发育起到抑制作用^[12]。刘俊等^[13]盆栽试验研究表明 Cd^{2+} 浓度为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,对大豆植株生物量和高度有促进作用,当 Cd^{2+} 浓度达到 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,大豆植株生物量被极显著的抑制,当镉浓度为 5 和 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时抑制作用更强。李勇等^[14]在玉米研究中也发现镉毒害后,玉米植株株高和干物重降低,并且镉浓度越高毒害越严重,症状出现的越早。本研究发现,不同镉浓度处理,栽培品种和野生品种的株高都有下降趋势,并且随着浓度提高,株高下降幅度变大,两者变化趋势相近。这说明株高是镉胁迫抑制大豆植株生长的重要形态指标,而且胁迫浓度越高,株高降幅越大,这与王志坤等^[9]和黄运湘等^[15]的研究结果一致。对不同处理时间的研究表明,随着培养时间延长,两种大豆的株高均有不同程度的增加,但是增幅表现出一定的差异。尤其在高浓度处理下,栽培大豆在第 30 天时,株高被抑制程度远大于野生大豆,这说明栽培大豆的株高较野生大豆对镉胁迫的抑制表现得更早,更明显。

3.2 镉胁迫对大豆抗氧化酶影响

镉逆境胁迫会导致植物体内活性氧含量升高,从而激发 SOD、CAT、POD 等抗氧化酶类以清除自由基,使生物自由基维持在一个低水平,从而对细胞有保护作用^[16-17]。王志坤等^[9]研究表明在 2.5 和 $10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 镉浓度处理 12 d 后,大豆幼苗过 POD 活性比对照显著增强。黄运湘等^[18]研究表明水培条件下 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的镉处理 5 d,大豆叶片 POD 活性低于对照,增加镉浓度,POD 活性升高,当 Cd 浓度达 $10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,POD 活性下降,但仍显著高于对照。Li 等^[16]研究表明镉处理浓度为 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,处理 6 d 时,和对照相比,SOD 活性显著降低,POD 活性显著提高,CAT 差异不显著。本研究表明,镉胁迫对栽培和野生大豆的 SOD、POD 和 CAT 活性都有一定影响。栽培大豆的 SOD 活性和 POD 活性在处理 20 d 时变化最大,SOD 活性随着镉浓度增加而显著下降;POD 活性总体上中低浓度促进,高浓度抑制;CAT 活性在处理 30 d 后才表现出与对照的显著差异,中低浓度差异不明显,只在高浓度被抑制。这说明 SOD 和 POD 活性对镉胁迫反应较 CAT 活性更灵敏,高浓度的抑制作用表现得更早,其中 POD 活性表现出明显的中低浓度促进,高浓度抑制的特点,这与前人研究结果相似。野生大豆的 3 种抗氧化酶活性没有栽培大豆对镉胁迫敏感,到处理 30 或 40 d 时才表现出一定的抑制效应,而且酶活降幅低于栽培大豆。这种酶活反应差异

可能缘于各自的抗性机制不同,总体上高浓度镉胁迫对栽培大豆的 SOD、POD 和 CAT 活性影响较野生大豆更大,抑制效果更明显。

3.3 镉胁迫对大豆丙二醛影响

植物在逆境胁迫下会发生膜脂过氧化反应进而产生 MDA,MDA 会与核酸、糖类及蛋白质等物质通过交联作用来影响细胞膜的构型和功能,因此 MDA 含量是反映膜脂过氧化作用强弱的一个重要指标^[19]。黄运湘等^[20]研究表明,大豆幼苗在低于 5 mg·kg⁻¹ 镉胁迫时,MDA 含量较对照低;当镉浓度高于 5.0 mg·kg⁻¹ 时,MDA 含量急剧上升高于对照。刘俊等^[13] 试验发现,当镉浓度一定时,在大豆幼苗早期叶片 MDA 含量较低,随着胁迫时间的增加 MDA 含量也随之增加,在结荚期 MDA 含量相对较高,到大豆成熟期 MDA 含量又逐步下降。本研究发现镉胁迫对栽培和野生两种大豆的 MDA 含量有一定影响。随着镉浓度的升高和处理时间的延长,栽培大豆的 MDA 含量表现出明显的增加趋势,这与前人研究结果一致。而野生大豆变化趋势与栽培大豆不同,除了中等浓度处理 40 d 时显著高于对照外,其它处理的叶片 MDA 含量或低于对照,或与对照差异不显著。这说明镉胁迫下野生大豆膜脂过氧化反应弱于栽培大豆。

野生大豆作为栽培大豆的优良基因源,在抗逆性方面已经表现出强大的优势。研究表明野生大豆在抗旱^[21]、耐盐^[22]、耐低温弱光^[23] 等方面优于栽培大豆。本研究发现不同镉浓度不同镉处理时间对栽培大豆抗氧化酶系统影响更大,高浓度长时间处理的抑制效果更明显,而野生大豆酶活变化较小,MDA 含量也较低,可能缘于两者的抗性机制不同,参与抗性基因及其代谢系统有所差异,具体的差异原因还有待于更深入的研究。总体上野生大豆抗性优于栽培大豆,可作为重要的遗传资源应用于大豆抗镉遗传育种研究中。

4 结 论

镉胁迫对栽培和野生大豆株高具有抑制作用,随着镉浓度的增加,处理时间延长,株高的降幅有增大的趋势。镉胁迫对栽培大豆株高的抑制作用较野生大豆表现得更早,更明显。

镉胁迫对栽培和野生大豆的 SOD、POD 和 CAT 活性都有一定影响。其中栽培大豆 SOD 和 POD 活性对镉胁迫反应较 CAT 活性更灵敏,高浓度的抑制作用表现得更早。野生大豆的酶活性没有栽培大豆对镉胁迫敏感,而且酶活降幅低于栽培大豆。高浓度镉胁迫对栽培大豆的 SOD、POD 和 CAT 活性

影响较野生大豆更大,抑制效果更明显。

镉胁迫对栽培和野生大豆的 MDA 含量有一定影响。随着镉浓度的提高和处理时间的延长,栽培大豆的 MDA 含量表现出明显的增加趋势,而野生大豆这种增加趋势不明显,只在部分中高浓度处理时才显著高于对照。镉胁迫下野生大豆膜脂过氧化反应弱于栽培大豆。

参考文献

[1] 曾希柏,徐建明,黄巧云,等. 中国农田重金属问题的若干思考[J]. 土壤学报,2013,50(1): 186-193. (Zeng X B, Xu J M, Huang Q Y, et al. Some thoughts on heavy metals in Chinese farmland[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(1): 186-193.)

[2] Zhong M S, Jiang L, Han D, et al. Cadmium exposure via diet and its implication on the derivation of health-based soil screening values in China[J]. Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology, 2015, 25: 433-442.

[3] 刘明浩,陈光辉,王悦. 植物耐镉机制研究进展[J]. 作物研究,2015,29(1):101-110. (Liu M H, Chen G H, Wang Y. Research progress on mechanisms of plant resistance to cadmium[J]. Crop Research, 2015, 29(1): 101-110.)

[4] Xue Z, Gao H, Zhao S. Effects of cadmium on the photosynthetic activity in mature and young leaves of soybean plants[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, 21: 4656-4664.

[5] Zhou H, Zeng M, Zhou X, et al. Assessment of heavy metal contamination and bioaccumulation in soybean plants from mining and smelting areas of southern Hunan province, China[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2013, 32(12): 2719-2727.

[6] 俞萍,高凡,刘杰,等. 镉对植物生长的影响和植物耐镉机制研究进展[J]. 中国农学通报,2017,33(11):89-95. (Yu P, Gao F, Liu J, et al. Physiological responses of soybean (*Glycine max*) to cadmium stress and its tolerance mechanism[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 33(11): 89-95.)

[7] 崔玮,张芬琴,金自学. Cd²⁺ 处理对两种豆科作物幼苗生长的影响[J]. 农业环境科学学报,2004,23(1):60-63. (Cui W, Zhang F Q, Jin Z X. Effects of treatment with Cd²⁺ on seedling growth of two beans[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2004, 23(1): 60-63.)

[8] Peng W, Xiao J D, Yian H, et al. Root morphological responses of five soybean [*Glycine max* (L.) Merr] cultivars to cadmium stress at young seedlings[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(2): 1860-1872.

[9] 王志坤,廖柏寒,黄运湘,等. 镉胁迫对大豆幼苗生长影响及不同品种耐镉差异性研究[J]. 农业环境科学学报,2006,25(5):1143-1147. (Wang Z K, Liao B H, Huang Y X, et al. Effects of Cd²⁺ on growth of *Glycine max* seedlings and Cd-tolerance differences of different varieties of *Glycine max*[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(5): 1143-1147.)

[10] 李娜娜,孔维国,张煜,等. 野生大豆耐盐性研究进展[J]. 西北植物学报,2012,32(5):1067-1072. (Li N N, Kong W G, Zhang Y, et al. Progress of salt tolerance study in wild soybean [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2012, 32(5):

1067-1072.)

[11] 李合生. 植物生理生化实验原理与技术[M]. 北京:高等教育出版社,2000: 164-179; 261-263. (Li H S. Principles and techniques of plant physiological and biochemical experiments[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 164-179; 261-263.)

[12] 刘俊,廖柏寒,曾清如,等. 镉胁迫对豆科作物生理生态效应研究进展[J]. 生态毒理学报,2010,5(2):295-301. (Liu J, Liao B H, Zeng Q R, et al. Advances on physiological and ecological effects of cadmium on legume crops[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2010, 5(2): 295-301.)

[13] 刘俊,廖柏寒,周航,等. 镉胁迫下大豆生长发育的生理生态特征 [J]. 生态学报,2010,30(2):333-340. (Liu J, Liao B H, Zhou H, et al. Main characteristics of physiological ecological dynamics of soybean during the growth cycle under Cd stress[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(2): 333-340.)

[14] 李勇,黄占斌,王文萍,等. 重金属铅镉对玉米生长及土壤微生物的影响 [J]. 农业环境科学学报,2009,28(11):2241-2245. (Li Y, Huang Z B, Wang W P, et al. Effects of heavy metal lead and cadmium on maize growth and soil microorganism[J]. Journal of Agricultural Environmental Science, 2009, 28, 11): 2241-2245.)

[15] 黄运湘,廖柏寒,肖浪涛,等. 镉处理对大豆幼苗生长及激素含量的影响 [J]. 环境科学,2006,27(7):1398-1401. (Huang Y X, Liao B H, Xiao L T, et al. Effects of Cd²⁺ on seedling growth and phytohormone contents of *Glycine max* [J]. Environment Science, 2006, 27(7): 1398-1401.)

[16] Li X M, Zhang L H, Li Y Y , et al. Changes in photosynthesis, antioxidant enzymes and lipid peroxidation in soybean seedlings exposed to UV-B radiation and/or Cd[J]. Plant Soil, 2012, 352(1-2): 377-387.

[17] 汪洪,赵士诚,夏文建,等. 不同浓度镉胁迫对玉米幼苗光合作用、脂质过氧化和抗氧化酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2008,14(1):36-42. (Wang H, Zhao S C, Xia W J, et al. Effect of cadmium stress on photosynthesis, lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities in maize (*Zea mays* L.) seedlings[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(1): 36-42.)

[18] 黄运湘,王志坤,袁红,等. 大豆对镉胁迫的生理反应及耐镉机理探讨[J]. 农业环境科学学报 2011,30(8):1514-1520. (Huang Y X, Wang Z K, Yuan H, et al. Physiological responses of soybean(*Glycine max*)to cadmium stress and its tolerance mechanism[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(8): 1514-1520.)

[19] 李明,王根轩. 干旱胁迫对甘草幼苗保护酶活性及脂质过氧化作用的影响[J]. 生态学报,2002,22(4):503-507. (Li M, Wang G X. Effect of drought stress on activities of cell defense enzymes and lipid peroxidation in glycyrrhiza uralensis seedlings[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(4): 503-507.)

[20] 黄运湘,廖柏寒,肖浪涛,等. 添加 Cd²⁺ 对大豆生长发育及逆境生理指标的影响[J]. 水土保持学报,2006,20(3):187-191. (Huang Y X, Liao B H, Xiao L T, et al. Metabolic responses of soybean (*Glycine max*) to Cadmium[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(3): 187-191.)

[21] 马光,郭继平,魏淑珍,等. 干旱胁迫下野生大豆和栽培大豆生理特性比较[J]. 大豆科学,2011,30(6):1057-1059. (Ma G, Guo J P, Wei S Z, et al. Comparison on physiological characteristics of *Glycine soja* and *Glycine max* under drought stress[J]. Soybean Science, 2011, 30(6): 1057-1059.)

[22] 薛忠财,高辉远,柳洁. 野生大豆和栽培大豆光合机构对 NaCl 胁迫的不同响应[J]. 生态学,2011,31(11):3101-3109. (Xue Z C, Gao H Y, Liu J. Different response of photosynthetic apparatus between wild soybean (*Glycine soja*) and cultivated soybean (*Glycine max*) to NaCl stress[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(11): 3101-3109.)

[23] 任丽丽,高辉远. 低温弱光胁迫对野生大豆和大豆栽培种光系统功能的影响[J]. 植物生理与分子生物学学报,2007,33(4):333-340. (Ren L L, Gao H Y. Effects of chilling stress under weak light on functions of photosystems in leaves of wild soybean and cultivatar soybean[J]. Journal of Plant Physiology and Molecular Biology, 2007, 33(4): 333-340.)