



野生大豆和不同栽培大豆品种在镉胁迫下种子萌发及幼苗生长的差异

赵毅¹, 于翠梅¹, 杨柳¹, 马莲菊², 谢甫缙¹

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

摘要:为探讨野生大豆和不同栽培大豆品种在镉胁迫下种子萌发的差异, 筛选优质的大豆耐镉资源, 首先比较 5 种镉浓度(5, 10, 25, 40 mg·L⁻¹)对野生大豆与栽培大豆的种子发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、根长及芽长等参数, 筛选出对镉敏感的性状及适中的镉浓度处理; 然后以此为基础比较野生大豆 1503、超高产大豆(沈农 9 号和辽豆 14)及普通栽培大豆(辽豆 16 和沈农 20)耐镉性差异。结果表明: 野生豆 1503 和栽培豆辽豆 16 种子的发芽率、发芽势及发芽指数在较高浓度(25 或 40 mg·L⁻¹)处理时明显下降, 其它浓度处理与对照差异不明显或者高于对照, 而活力指数、根长及芽长等指标在较低浓度(5 或 10 mg·L⁻¹)处理时就表现明显的被抑制效应, 尤其对根长抑制更明显。活力指数、根长及芽长对镉胁迫更为敏感, 可以作为鉴定耐镉材料及监测镉胁迫对植物的影响的重要指标。在 5 mg·L⁻¹镉处理下, 1503 的活力指数、根长、芽长与对照差异不显著, 10 mg·L⁻¹时显著下降, 辽豆 16 在 5 mg·L⁻¹时 3 种参数显著低于对照, 因此镉浓度 5 mg·L⁻¹的处理适中, 可用来比较不同品种的耐镉性。在 5 mg·L⁻¹镉处理下, 按照 3 个敏感性状的平均值, 筛选出耐镉性较强野生豆 1503, 镉性较弱的栽培豆沈农 20, 可用于耐镉育种及耐镉机制研究。

关键词:栽培大豆; 野生大豆; 镉胁迫; 萌发; 幼苗

Differences of Cadmium Stress on Seed Germination and Seedling Growth in the Wild Soybean and Cultivated Soybeans

ZHAO Yi¹, YU Cui-mei¹, Yang Liu¹, MA Lian-ju², XIE Fu-ti¹

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

Abstract: To screen the cadmium-tolerant soybean resources, the differences of cadmium stress on the germination and seedling growth of wild soybean and different cultivated soybean seeds were studied. Firstly 5 cadmium concentrations (5, 10, 25, 40 mg·L⁻¹) on the germination rate, germination energy, germination index, vigor index, root length and shoot length of wild soybean and cultivated soybean were compared to screen out cadmium sensitive characters and moderate cadmium concentration, which would be used to compare the cadmium tolerance of wild soybean 1503, super high yield soybean (Shennong 9 and Liaodou 14) and common cultivated soybean (Liaodou 16 and Shennong 20). The results showed that germination rate, germination energy and germination index of the 1503 and Liaodou16 significantly lower than those of control under the treatment of higher concentration(25 or 40 mg·L⁻¹) cadmium. Other treatments were not significantly different from the control group. While the vigor index, root length and shoot length were restrained evidently at lower concentrations (5 or 10 mg·L⁻¹) cadmium and the inhibiting effect of cadmium stress was larger on the root length than the shoot length. The vigor index, root length and bud length were more sensitive to cadmium stress, which could be used as an important indicator to identify cadmium resistant materials and to monitor the degree of cadmium stress. The cadmium concentration of 5 mg·L⁻¹ is moderate, which could be used to compare the cadmium tolerance of different varieties. According to comprehensive effect values in seedlings, 1503 were relatively strong cadmium tolerance, Shennong 20 was relatively weak cadmium tolerance. These soybean materials could be used to explore the tolerance mechanism of soybean under cadmium stress and as important genetic resources in anti-cadmium breeding of soybeans.

Keywords: Cultivated soybean; Wild soybean; Cadmium stress; Germination; Seedling

镉是最危险的重金属之一, 它可以通过工业和农业生产进入了农业土壤并被作物吸收, 然后再通过食物链进入人体。过量的镉积累会危害作物的

生长发育, 也会威胁人类的健康^[1]。大豆是我国重要的经济作物和油料作物, 研究表明镉胁迫对大豆种子萌发^[2]、植株生长发育^[3]及生物量^[4]等都具有

收稿日期: 2018-12-14

基金项目: 辽宁省科技厅项目(2015020762)。

第一作者简介: 赵毅(1997-), 男, 学士, 主要从事大豆耐镉研究。E-mail: 1943311393@qq.com。

通讯作者: 于翠梅(1974-), 女, 博士, 副教授, 主要从事大豆耐镉育种研究。E-mail: yucui@163.com。

不良影响。但是具有明显抗镉性的大豆品种还很少,急需拓宽大豆遗传资源。野生大豆是栽培大豆的近缘野生种,具有相同的染色体数,可以与栽培大豆杂交繁育后代,是拓宽栽培大豆遗传基础的重要基因来源^[5]。野生大豆具有多种优良性状,如固氮能力强、蛋白质含量高、种子繁殖系数大,尤其具有较强的抗逆性^[6-11]。Xue 等^[12]比较镉胁迫下,野生大豆(DY-03262)与栽培大豆(SN-11)幼苗光合反应及镉含量差异,结果表明镉处理后,野生大豆叶片光合指标降低幅度更大,可能由于叶片和根器官镉含量更高导致。本课题组前期研究了镉胁迫下野生大豆 1502 和栽培大豆辽豆 24 苗期的株高、抗氧化酶活及 MDA 含量等生理指标变化特征及差异,综合评价野生大豆较栽培大豆具有更强的耐镉性^[13-14],有关野生大豆与栽培大豆耐镉性差异有待于进一步深入研究。植物对镉胁迫的响应还会受到胁迫浓度、胁迫时期及品种基因型间差异等因素影响而不同^[14]。研究表明种子萌发对重金属胁迫比较敏感,是植物对胁迫耐性评价的重要时期^[15]。为此,本研究以野生大豆和栽培大豆为材料,研究不同镉浓度处理下大豆种子萌发、根芽生长特征及两者差异,并且在相同胁迫条件比较野生大豆、超高产栽培大豆及普通栽培大豆耐镉性差异,以期反映野生大豆在镉胁迫下种子萌发的变化特征,筛选耐镉性材料,为大豆耐镉育种提供遗传资源。

1 材料与方法

1.1 材料

供试材料为野生大豆 1503,超高产栽培大豆辽豆 14 和沈农 9 号,普通栽培大豆辽豆 16 和沈农 20,由沈阳农业大学大豆研究所提供。

1.2 试验设计

1.2.1 不同镉浓度对野生大豆和栽培大豆种子萌发及幼苗生长影响 选取颗粒饱满、大小均匀的 1503 和辽豆 16 大豆种子,用次氯酸钠溶液进行浸泡消毒,蒸馏水洗净后置于 55~60℃ 的温水中浸泡 10 min,拿出均匀排列在直径 15 cm、垫有 4 层纱布的培养皿中。分别用镉浓度为 5,10,25,40 mg·L⁻¹ 处理,以清水为对照,每个培养皿 30 粒种子,每个处理 3 皿。将培养皿放入人工气候培养箱中,温度设定 25℃,湿度 60% 条件下黑暗培养,每日统计发芽率,萌发第 7 天测定根长和芽长。

1.2.2 相同镉浓度对不同类型大豆种子萌发和幼苗生长影响 镉浓度为 5 mg·L⁻¹ 处理野生大豆 1503,超高产栽培大豆辽豆 14 和沈农 9 号,普通栽

培大豆辽豆 16 和沈农 20。处理方法及数据调查方法同 1.2.1。

1.3 测定项目与方法

发芽率(%) = 第 7 天内正常发芽的种子数/供试种子总数 × 100;

发芽势(%) = 第 3 天内正常发芽的种子数/供试种子总数 × 100;

发芽指数 = $\sum (Gt/Dt)$ (式中, Dt 为发芽日数, Gt 为在 t 日内的发芽数);

活力指数 = $GI \times S$ (式中, GI 为发芽指数, S 为株高)。

综合效应值指同一品种活力指数、芽长和根长的平均值。

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($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 镉胁迫对种子发芽率和发芽势的影响

不同镉浓度处理下,两种大豆种子发芽势和发芽率呈现先升高后降低趋势(图 1),发芽势在较高镉浓度 25 和 40 mg·L⁻¹ 处理时都显著低于对照,辽豆 16 降幅分别为 12.8%,27.9%,1503 降幅分别为 8.7%,20.4%,其降幅略低于栽培大豆(图 1A)。发芽率在不同镉处理下变化较发芽势小,辽豆 16 处理与对照差异不显著,1503 只在最高浓度 40 mg·L⁻¹ 时显著低于对照,其它处理与对照差异不显著(图 1B)。镉处理前后 1503 发芽势和发芽率都低于辽豆 16,说明野生大豆发芽能力低于栽培大豆,但两者发芽率和发芽势对镉胁迫反应差异不明显。

2.2 镉胁迫对种子发芽指数和活力指数的影响

不同镉浓度处理对两种大豆的活力指数影响较发芽指数更大(图 2)。发芽指数随着镉浓度的提高呈现先升高后降低趋势,只在 40 mg·L⁻¹ 浓度时,辽豆 16 显著低于对照,1503 与对照差异不显著。其它浓度处理与对照差异不显著(图 2A)。镉处理对活力指数影响很大。随着镉浓度的提高,辽豆 16 活力指数逐渐下降,各处理与对照都达到显著水平,降幅分别 20.2%、52.94%、74.81%、82.58%;1503 活力指数呈现先升高后降低的趋势,除了 5 mg·L⁻¹ 浓度与对照差异不显著外,其它处理显著低于对照,降幅分别为 25.84%、53.92%、65.25%,降幅低于栽培大豆(图 2B),说明野生大豆对镉胁迫耐受性强于栽培大豆。

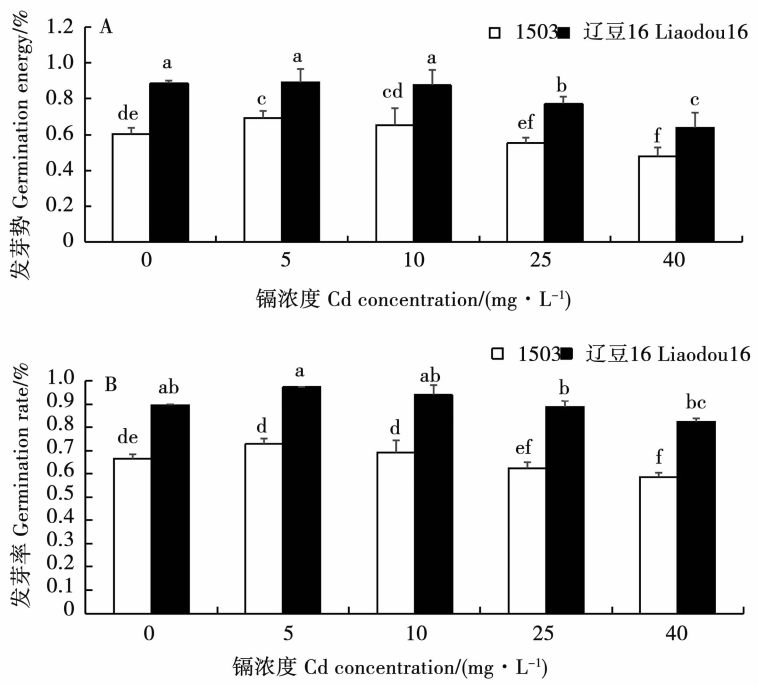


图1 不同浓度镉对大豆发芽势(A)和发芽率(B)的影响

Fig.1 Effect of cadmium concentration on soybean seed germination energy (A) and germination rate(B)

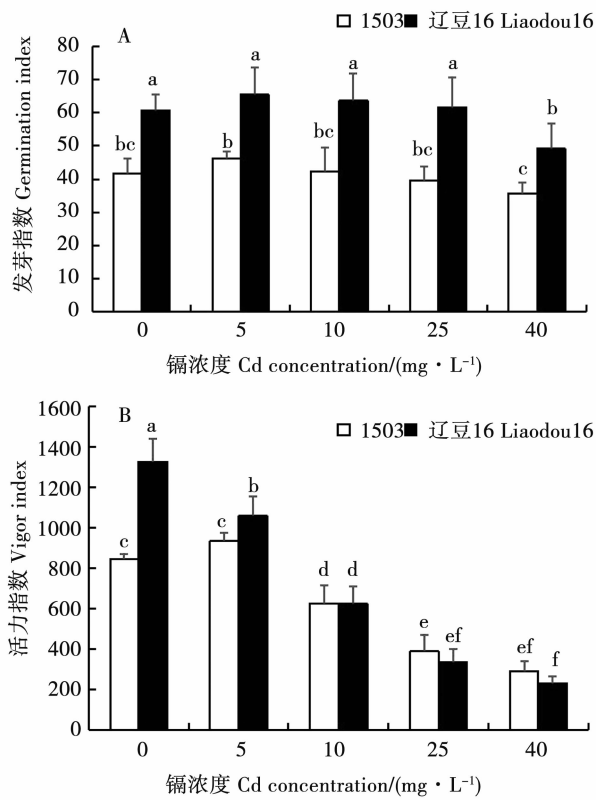


图2 不同浓度镉对大豆发芽指数(A)和活力指数(B)的影响

Fig.2 Effect of cadmium concentration on soybean seed germination index (A) and vigor index(B)

2.3 镉胁迫对幼苗芽长和根长的影响

镉处理对两种大豆萌发后幼苗的根长和芽长影响都很大(图3)。辽豆16的芽长随着镉浓度的

提高而逐渐下降,与对照差异显著,降幅分别为11.45%、45.4%、75.27%、82.02%;1503芽长是先升高再降低,除了 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度与对照差异不显著

外,其它处理显著低于对照,降幅分别为 11.09 %、36.54 %、49.1 % ,降幅远低于辽豆 16,尤其在较高镉浓度下,芽长显著高于辽豆 16 (图 3A)。两种大豆根长在镉处理下变化趋势与芽长相似,除了 1503 在镉浓度 5 mg·L⁻¹ 时与对照差异不显著外,其它都呈现下降趋势,但是降幅较芽长更大。在镉浓度 10 mg·L⁻¹ 时,辽豆 16 芽长降幅为 45.4%,根长降幅为 69.23%,1503 芽长降幅为 11.09%,根长降幅为

47.85%。在较高镉浓度下,两种大豆根长差异不显著(图 3B)。从图 3C 可以看出辽豆 16 在镉浓度 10 mg·L⁻¹ 时根尖发黑,到 25 和 40 mg·L⁻¹ 时整个根部发黑,1503 在 25 和 40 mg·L⁻¹ 时也表现出根尖发黑症状。综上表明镉胁迫对幼苗根的抑制比芽更明显,野生大豆对镉的耐受性高于栽培大豆,而芽长耐受性高于根长。

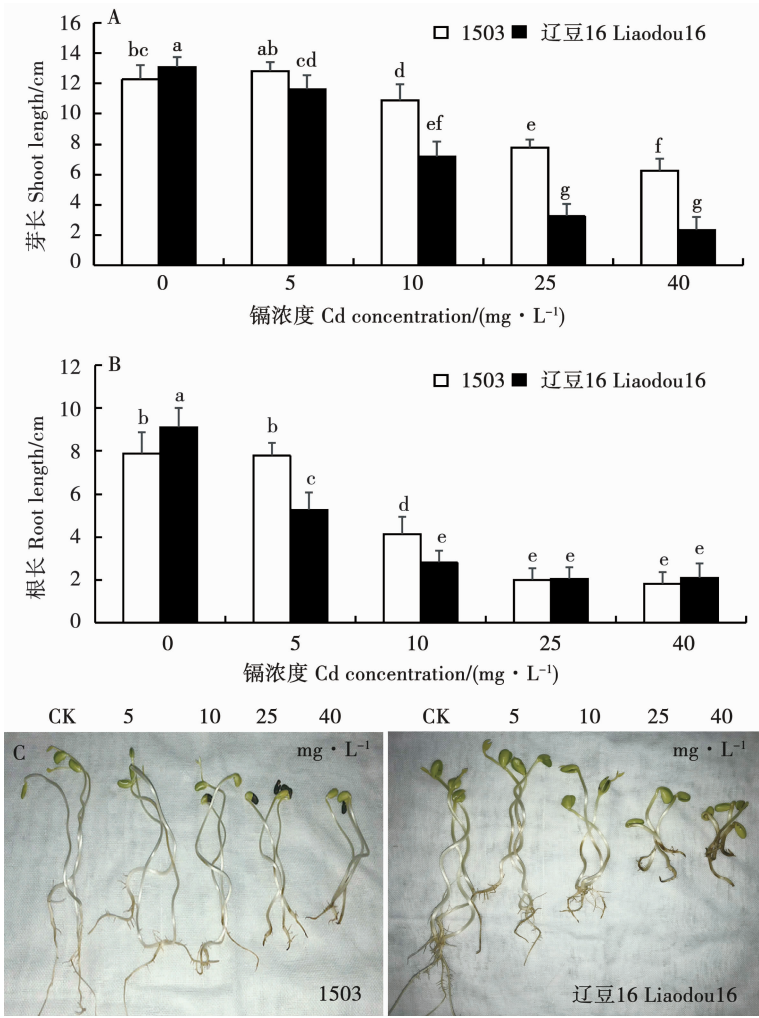


图 3 不同镉浓度对大豆芽长(A)、根长(B)及幼苗形态(C)的影响
Fig.3 Effect of cadmium concentration on soybean shoot length(A), root length(B) and seedling morphology(C)

2.4 镉胁迫对不同大豆萌发和幼苗生长的影响

在 5 mg·L⁻¹ 镉处理下,1503 的活力指数、根长、芽长与对照差异不显著,到 10 mg·L⁻¹ 时显著下降,辽豆 16 在 5 mg·L⁻¹ 时 3 种参数显著低于对照,因此镉浓度 5 mg·L⁻¹ 的处理适中,可用来比较不同品种的耐镉性。镉浓度为 5 mg·L⁻¹ 胁迫下,1503 活力指数、芽长和根长与对照差异不显著,而不同栽培大豆品种的 3 种指标较对照都显著下降(图 4)。在不同栽培品种中,普通栽培品种沈农 20 的 3 种指标

较对照降幅都最大,活力指数为 41.59%,芽长为 21.07%,根长为 64.24%。在 3 种指标中,根长平均降幅最大,为 42.02%,芽长平均降幅最小,为 16.01%,这说明幼苗的根长对镉胁迫最敏感。利用 3 种参数的综合效应值进行耐镉性评价,1503 综合效应值比对照高出 9.9%,而其它栽培品种较对照都下降,降幅最大的是沈农 20 为 41.57%,辽豆 16,辽豆 14,沈农 9 号位于中间,分别为 20.3%,25.45%,22.12%。

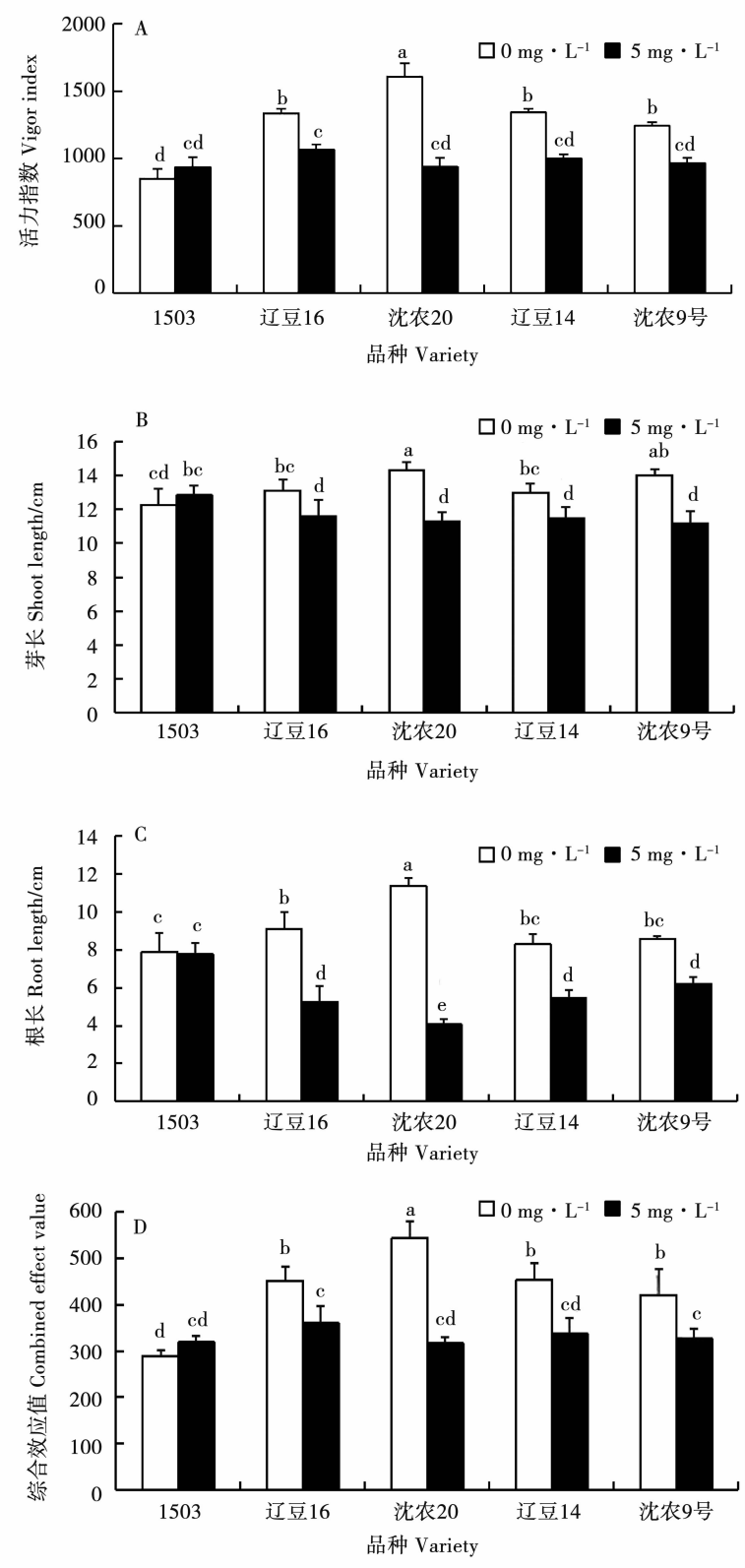


图4 镉胁迫对不同大豆活力指数(A)、芽长(B)、根长(C)、综合效应值(D)的影响

Fig.4 Effects of cadmium stress on vigor index(A) , shoot length(B) , root length(C) and combined effect value(D) of different soybean varieties

3 讨 论

种子萌发是植物生长的起始阶段,其状态直接影响植物后期的生长发育^[2],同时它对外界环境胁迫最为敏感,其变化特征反映了植物对胁迫的耐受能力^[16]。种子发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数

及幼苗根长和芽长等都是研究种子萌发的基本参数。许多研究表明镉胁迫对这些参数有不同程度的影响^[17]。吴鹏等^[15]研究指出低浓度镉处理(3 mg·L⁻¹)可以提高大豆种子的发芽指数与活力指数,具有促进萌发作用;随着镉浓度的升高(6和9 mg·L⁻¹),发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数均逐渐降低,进而表现为抑制作用。孟桂元等^[18]研究表明镉浓度为0.5 mmol·L⁻¹对水稻种子的发芽率、发芽指数影响不大,对活力指数及根芽生长影响较大,而且对根抑制作用更强。对玉米种子进行50 mg·L⁻¹的镉浓度处理,也发现种子的萌发率、发芽指数变化不大,而对活力指数、根及芽生长抑制明显^[19]。本研究设置5种镉浓度(5,10,25,40 mg·L⁻¹)处理,发现野生豆1503和栽培豆辽豆16种子的发芽率、发芽势及发芽指数在较高浓度(25或40 mg·L⁻¹)处理时明显下降,其它浓度处理与对照差异不明显,或者高于对照;而活力指数、根长及芽长等指标在较低浓度(5或10 mg·L⁻¹)处理时就表现明显的被抑制效应,而且对根长抑制更明显。综上所述这些种子萌发参数对镉胁迫的敏感程度不同。种子的发芽率、发芽势及发芽指数主要衡量种子萌发的快慢及发芽的整齐度,而活力指数的计算中往往引入种子萌发后幼苗生长的参数,如株高、根长或芽长等性状,主要衡量种子萌发后幼苗受镉胁迫的程度。本研究表明镉对萌发后幼苗生长的影响大于种子萌发,其原因可能是种子萌发时有种皮阻挡镉与胚直接接触^[17],而萌发后胚根首先接触镉并且吸收镉,能够在根部周围诱导细胞产生乙烯直接伤害根部的组织^[20],本研究也发现随着镉浓度提高,根尖首先发黑的现象。另外向芽端输送镉会引起细胞活性氧代谢失衡造成膜脂过氧化加剧^[21],扰乱子叶中淀粉酶活性,使淀粉水解受到抑制^[22],导致营养物质无法运输到胚根和胚芽^[23],因此镉对萌发后幼苗生长抑制作用更强,而且对根长抑制大于对芽长的抑制,本研究也发现在较高镉浓度下,两种大豆的根长降幅远高于芽长降幅,而且野生大豆芽长受镉抑制程度远小于栽培大豆。因此本研究表明发芽势、发芽率和发芽指数对镉胁迫耐受性更强,只在较高镉浓度下才表现胁迫的抑制效应,而活力指数、根长及芽长对镉胁迫更为敏感,可以作为鉴定耐镉材料及监测镉胁迫对植物影响的重要指标。

野生大豆具有多种优良性状,尤其是抗逆性,是抗镉育种的重要的遗传资源^[13]。本研究表明1503种子活力指数、根长、芽长在镉胁迫下的降幅都低于辽豆16,而且耐镉浓度高于辽豆16。在镉浓度为5 mg·L⁻¹时,1503的活力指数、根长、芽长与对

照差异不显著,到10 mg·L⁻¹时才有下降,辽豆16在5 mg·L⁻¹时3种参数显著低于对照。这说明野生大豆耐镉性强于栽培大豆。这与前期对野生大豆与栽培大豆苗期对镉胁迫反应差异的研究结果一致^[13,24]。超高产大豆是在实践中创造过超高产典型的大豆品种,从中筛选耐镉资源对于大豆耐镉育种具有重要意义^[25]。本研究表明在5 mg·L⁻¹镉处理下,比较野生大豆、超高产栽培大豆及普通栽培大豆耐镉性差异,利用3种参数的综合效应值进行耐镉性评价,1503综合效应值比对照高出9.9%,而其它栽培品种较对照都下降,降幅最大的是沈农20为41.57%,辽豆16、辽豆14、沈农9位于中间,分别为20.3%,25.45%,22.12%。这说明野生豆耐镉性最强,超高产栽培大豆没有表现出比普通栽培大豆更强的耐镉优势。本文只比较了镉胁迫下不同类型大豆种子萌发及幼苗生长等形态性状的差异,对于其生理生化特性及分子机制的变化差异有待于进一步深入研究。

4 结 论

本研究表明不同镉浓度对野生大豆和栽培大豆的种子萌发参数影响不同,发芽势、发芽率和发芽指数对镉胁迫耐受性更强,只在较高镉浓度下才表现胁迫的抑制效应。活力指数、根长及芽长对镉胁迫更为敏感,尤其是根长最为敏感,这些参数可以作为鉴定耐镉材料及监测镉胁迫对植物的影响的重要指标。1503种子活力指数、根长、芽长在较高浓度镉胁迫下的降幅低于辽豆16,而且耐镉浓度高于辽豆16。在5 mg·L⁻¹镉处理下,1503的活力指数、根长、芽长与对照差异不显著,到10 mg·L⁻¹时显著下降,辽豆16在5 mg·L⁻¹时3种参数显著低于对照,因此镉浓度5 mg·L⁻¹的处理适中,可用来比较不同品种的耐镉性。在5 mg·L⁻¹镉处理下,依据3个敏感性状的综合效应值,筛选出耐镉性较强野生大豆1503,耐镉性较弱的栽培大豆沈农20,可用于耐镉育种及耐镉机制研究。

参考文献

[1] Yuan X, Wang J, Shang Y E, et al. Health risk assessment of cadmium via dietary intake by adults in China[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2014, 94:373-380.

[2] Liu T T, Wu P, Wang L H, et al. Response of soybean seed germination to cadmium and acid rain[J]. Biological Trace Elemnet Research, 2011, 144:1186-1196.

[3] Xue Z C, Gao H Y, Zhang L T. Effects of cadmium on growth, photosynthetic rate, and chlorophyll content in leaves of soybean seedling[J]. Biologia Plantarum, 2013, 57 (3): 587-590.

[4] 赵云云,钟彩霞,方小龙,等. 华南地区夏播大豆品种镉耐性及籽粒镉积累的差异[J]. 大豆科学,2013,32(3):336-340. (Zhao Y Y,Zhong C X,Fang X L ,et al. Genotypic differences in tolerance and accumulation to Cd among summer-soybean varieties in south China[J]. Soybean Science,2013,32(3):336-340.)

[5] Lam H M,Xu X,Liu X,et al. Resequencing of 31 wild and cultivated soybean genomes identifies patterns of genetic diversity and selection[J]. Nature Genetics,2010,42:1053-1059.

[6] 张煜,李娜娜,丁汉凤,等. 野生大豆种质资源及创新应用研究进展[J]. 山东农业科学,2012,44(4):31-35. (Zhang Y,Li N N,Ding H F ,et al. Research progress of wild soybean germplasm and utilization[J]. Shandong Agricultural Sciences,2012,44(4):31-35.)

[7] 纪展波,蒲伟凤,李桂兰,等. 野生大豆、半野生大豆和栽培大豆对苗期干旱胁迫的生理反应[J]. 大豆科学,2012,31(4):598-604. (Ji Z B,Pu W F,Li G L,et al. Physiological reaction of *Glycine soja*,*Glycine gracilis* and *Glycine max* to drought stress in seedling stage[J]. Soybean Science,2012,31(4):598-604.)

[8] 钟超,李银萍,孙素丽,等. 野生大豆资源对大豆疫病抗病性和耐病性鉴定. 植物遗传资源学报,2015,16(4):684-690. (Zhong C,Li Y P,Sun S L,et al. Identification of resistance and tolerance to phytophthora *sojae* in wild soybean germplasm[J]. Journal of Plant Genetic resources,2015,16(4):684-690.)

[9] Luo Q, Yu B, Liu Y. Differential sensitivity to chloride and sodium ions in seedlings of *Glycine max* and *G. soja* under NaCl stress[J]. Journal of Plant Physiology,2003,16:1003-1012.

[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 Bot Boreal-Occident Sinica,2012,32(5):1067-1072.)

[11] Qi X,Li M W,Xie M,et al. Identification of a novel salt tolerance gene in wild soybean by whole-genome sequencing [J]. Nature Communications,2014,5:4340.

[12] Xue Z C,Gao H Y. The difference of photosynthetic responses to the cadmium stress between a wild soybean (*Glycine soja* Sieb. et Zucc.) and a cultivated soybean[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology,2017,99:405-410.

[13] 冯君,赵毅,高婷,等. 野生和栽培大豆对镉胁迫的响应差异分析[J]. 大豆科学,2018,37(5):756-761. (Feng J, Zhao Y, Gao T,et al. The difference of responses to the cadmium stress between a wild soybean and a cultivated soybean[J]. Soybean Science,2018,37(5):756-761.)

[14] 樊金娟,刘宇,曹樱迪,等. 玉米对镉胁迫的响应及其耐镉机制研究进展[J]. 沈阳农业大学学报,2018,49(5):633-640. (Fan J J, Liu Y , Cao Y D, et al. Responses of maize to cadmium stress and mechanisms of cadmium tolerance[J]. Journal of Shenyang Agricultural University,2018,49(5):633-640.)

[15] 吴鹏,周青. 大豆种子萌发对镉胁迫响应的观察[J]. 大豆科学,2009,28(5):853-855. (Wu P,Zhou Q. Response of soybean seed germination to cadmium stress[J]. Soybean Science,2009,28(5):853-855.)

[16] 潘高,张合平,刘鹏,等. 镉胁迫对苍耳种子萌发及幼苗生理生化特性的影响[J]. 草业学报,2017,26(11):157-166. (Pan G,Zhang H P,Liu P,et al. Effect of man ganese stress on seed germination seedling physiological and biochemical characteristics of *Xanthium sibiricum*[J]. Acta Prataculturae Sinica,2017,26(11):157-166.)

[17] 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. Effect of Cd on plant growth and its tolerance mechanism[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2017,33(11):89-95.)

[18] 孟桂元,唐婷,周静,等. 不同水稻品种种子萌发及根芽生长的耐镉性差异研究[J]. 杂交水稻,2015,30(5):65-69. (Meng G Y,Tang T,Zhou J, et al. Studies on cadmium tolerance differences of seed germination and growth of roots and shoots in different rice varieties[J]. Hybrid Rice,2015,30(5):65-69.)

[19] 孟桂元,唐婷,周静,等. 不同玉米品种种子萌发期耐镉性分析[J]. 分子植物育种,2016,11(14):3166-3171. (Meng G Y, Tang T,Zhou J, et al. Analysis on cadmium tolerance of different maize varieties during seed germination stage[J]. Molecular Plant Breeding,2016,11(14):3166-3171.)

[20] 季玉鸣,李振国,余叔文,等. 镉引起小麦苗逆境乙烯的产生及其和镉的吸收分布[J]. 植物生理学报,1989,15(2):159-166. (Ji Y M,Li Z G,Yu S W, et al. Stress ethylene production induced by cadmium in wheat seedlings and its relation to cadmium uptake and distribution[J]. Acta Phytophysiolica Sinica,1989,15(2):159-166.)

[21] 张治安,王振民,徐克章. Cd 胁迫对萌发大豆种子中活性氧代谢的影响[J]. 农业环境科学,2005,24(4):670-673. (Zhang Z A,Wang Z M,Xu K Z. Effect of Cadmium stress on active oxygen metabolism in germinated soybean seeds[J]. Journal of Agro-Environment Science,2005,24(4):670-673.)

[22] 于立旭,尚宏芹,张存家,等. 外源硫化氢对镉胁迫下黄瓜胚轴和胚根生理生化特性的影响[J]. 园艺学报,2011,38(11):2131-2139. (Yu L X,Shang H Q,Zhang C J, et al. Effects of exogenous H₂S on the physiological and biochemical characteristics of the cucumber hypocotyl and radicle under cadmium stress[J]. Acta Horticulturae Sinica,2011,38(11):2131-2139.)

[23] Sfafi-Boushbih A,Chaoui A,Ferjani E E. Cadmium impairs mineral and carbohydrate mobilization during the germination of bean seeds[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety,2010,73(6):1123-1129.

[24] 张焜璐. 镉胁迫对栽培大豆和野生大豆幼苗碳氮代谢影响的研究[D]. 沈阳:沈阳师范大学,2018. (Zhang Y L. Effects of Cd stress on carbon and nitrogen metabolism of cultivated and wild soybean[D]. Shenyang: Shenyang Normal University,2018.)

[25] 赵玉昆,张惠君,敖雪,等. 磷酸二铵对大豆超高产品种养分吸收与利用的影响[J]. 中国农业科学,2014,47(12):2326-2334. (Zhao Y K, Zhang H J, Ao X,et al. Effect of different diammonium phosphate levels on nutrient uptake of super-high yielding soybean[J]. Scientia Agricultura Sinica,2014,47(12):2326-2334.)