

Hg²⁺、Pb²⁺ 对野生型绿豆种子萌发、幼苗生长及抗氧化酶活性的影响

常云霞, 陈 璨, 阮先乐, 吴苗苗, 陈 龙*

(周口师范学院 生命科学系, 河南 周口 466001)

摘要: 为了解重金属污染对野生型绿豆和栽培型绿豆的不同影响, 采用水培方法, 以去离子水培养为对照(CK), 研究了重金属离子 Hg²⁺、Pb²⁺、(Hg²⁺+Pb²⁺) 污染对野生型绿豆 E 和栽培型绿豆 P 种子萌发、幼苗生长及抗氧化酶活性的影响。结果表明: Hg²⁺、Pb²⁺ 和 (Hg²⁺+Pb²⁺) 污染均能抑制绿豆种子的萌发和幼苗的生长, 伤害程度为 (Hg²⁺+Pb²⁺) > Hg²⁺ > Pb²⁺, 其中 (Hg²⁺+Pb²⁺) 质量浓度为 (2.0+100) mg/L 时, 品种 P 的发芽率、幼苗苗高和根长分别比其 CK 降低 25.8%、48.1% 和 79.7%, 品种 E 分别比其 CK 降低 22.4%、44.7%、70.0%; 一定质量浓度的 Hg²⁺、Pb²⁺、(Hg²⁺+Pb²⁺) 污染下, 绿豆叶片内的抗氧化酶活性提高, 其中 (Hg²⁺+Pb²⁺) 质量浓度为 (2.0+100) mg/L 时, 品种 P 叶片内 SOD、POD、CAT 的活性比其 CK 分别增加了 113.7%、304%、254%, 品种 E 叶片内 SOD、POD、CAT 的活性比其 CK 分别增加了 131.0%、333% 和 278%。可见, Hg²⁺、Pb²⁺、(Hg²⁺+Pb²⁺) 胁迫下野生绿豆 E 品种的萌发能力、幼苗生长及其抗氧化能力均高于栽培绿豆 P 品种。

关键词: 栽培型绿豆; 野生型绿豆; 重金属; 汞离子; 铅离子; 种子萌发; 幼苗生长; 抗氧化酶

中图分类号: S522 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-3268(2012)07-0037-05

Effects of Hg²⁺ and Pb²⁺ on Seed Germination, Growth and Antioxidant Enzymes Activities of Wild Type Mung Bean

CHANG Yun-xia, CHEN Can, RUAN Xian-le, WU Miao-miao, CHEN Long*

(Department of Life Science, Zhoukou Normal University, Zhoukou 466001, China)

Abstract: In order to investigate the different effects of heavy metal pollution on wild and cultivated-type mung bean, effects of pollution of single and combined heavy metal ions of Hg²⁺, Pb²⁺, Hg²⁺ and Pb²⁺ on the seed germination, growth and antioxidant enzymes activities of mung bean seedling were studied by hydroponics culture in pots, with the deionized water culture as control (CK). The results showed that the seed germination and seedling growth were inhibited under the pollution of single and combined ions of Hg²⁺ and Pb²⁺, followed by (Hg²⁺+Pb²⁺) > Hg²⁺ > Pb²⁺. The germination percentage, seedling length and root length of type P mung bean reduced by 25.8%, 48.1% and 79.7% compared with the control under (2.0+100) mg/L of (Hg²⁺+Pb²⁺) stress, and these indicators of wild type mung bean reduced by 22.4%, 44.7% and 70.0% respectively. In addition, the antioxidant enzymes activities of leaf were increased observably after the heavy metal treatment. The activities of SOD, POD and CAT of type P mung bean increased by 113.7%, 304% and 254% under (2.0+100) mg/L of (Hg²⁺+Pb²⁺) stress, and the activities of SOD, POD and CAT of wild type mung bean increased by 131%, 333% and 278% compared respectively with the control. It was concluded that the seed germination, growth and antioxidant enzymes activities of wild type mung bean were more significant than those of the type P mung bean under Hg²⁺, Pb²⁺ and (Hg²⁺+Pb²⁺) stress.

Key words: cultivated type mung bean; wild type mung bean; heavy metal; Hg²⁺; Pb²⁺; seed germination; seedling growth; antioxidant enzyme

收稿日期: 2012-02-14

基金项目: 河南省教育厅自然科学研究计划资助项目(2009B180029); 周口师范学院生物化学与分子生物学重点学科建设项目

作者简介: 常云霞(1978-), 女, 河南漯河人, 讲师, 硕士, 主要从事植物抗性生理研究。E-mail: changyx618@126.com

* 通讯作者: 陈 龙(1962-), 男, 河南周口人, 教授, 本科, 主要从事生物化学与分子生物学研究。E-mail: chenlongzg@126.com

随着工业污染、城市污染的不断加剧以及农用化学物质种类、数量的增加,土壤重金属污染日益严重,并成为当今环境科学研究的主要内容^[1-5]。绿豆又名青小豆,因其颜色青绿而得名,在我国已有 2 000 余年的栽培史,是我国重要的粮食作物。因其具有重要的营养价值和医用价值,现已作为重要的功能型食品进行开发。随着重金属环境污染的日益加重,绿豆的生产也受到了严重威胁。目前,有关重金属对绿豆生长的影响研究多集中于重金属对绿豆种子萌发及幼苗生长的影响等方面^[6-9],但就重金属对野生型绿豆种子萌发、幼苗生长及抗氧化酶活性的研究鲜见报道。鉴于此,研究了不同质量浓度的 Hg^{2+} 和 Pb^{2+} 单一及复合污染对野生型和栽培型绿豆种子萌发、幼苗生长发育及抗氧化酶活性的影响,以期对绿豆重金属污染的监测和综合治理提供理论基础和技术平台。

1 材料和方法

1.1 供试材料和试剂

野生型绿豆(E)采于郑州附近黄河南岸滩区,栽培型绿豆(早熟绿豆王,P)由周口市种子公司提供。重金属离子 Hg^{2+} 、 Pb^{2+} 分别以 HgCl_2 、 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ (分析纯,均由天津化学试剂厂生产)形态提供。其中, HgCl_2 含 Hg^{2+} 73.89%, $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 含 Pb^{2+} 62.55%。

1.2 材料培养与试验设计

取粒大饱满的 2 种绿豆种子,用 0.1% 的 HgCl_2 表面消毒 10 min 后,去离子水反复冲洗,在装有不同质量浓度处理液(表 1)并铺双层滤纸的培养皿(直径为 90 mm)中分别均匀放置 50 粒,进行种子萌发与幼苗生长试验,以去离子水培养作为对照(CK),重复 3 次。培养室为恒温 25 °C,光照度 4 000~4 500 lx,光/暗周期 14 h/10 h。单一和复合处理质量浓度设计见表 1。

表 1 Hg^{2+} 、 Pb^{2+} 单一处理和复合处理的质量浓度设置 mg/L

重金属离子	质量浓度		
	低(I)	中(II)	高(III)
Hg^{2+}	0.5	1.0	2.0
Pb^{2+}	20	40	100
$\text{Hg}^{2+}+\text{Pb}^{2+}$	0.5+20	1.0+40	2.0+100

1.3 测定项目及方法

1.3.1 发芽率、苗高及根长的测定 当胚根与种子等长、胚芽长度达到种子一半时,即认为种子已经发

芽^[10]。连续观察记录各组绿豆的发芽情况直至各品种 CK 的发芽率不再变化,计算各品种在不同处理下的发芽率,发芽率=(供试种子的发芽数/供试种子总数)×100%。等子叶长出 3 d 后,各处理选取有代表性的 10 株幼苗,分为地上部分和地下部分进行苗高和根长的测定。

1.3.2 生理指标测定方法 待幼苗长出 4 片真叶时,分别取幼苗相同部位的新鲜叶片测定抗氧化酶活性。超氧化物歧化酶(SOD)活性测定采用 NBT 光化还原法^[11];过氧化物酶(POD)活性测定采用愈创木酚比色法^[12];过氧化氢酶(CAT)活性测定采用高锰酸钾滴定法^[11]。

1.4 数据分析

采用 Excel 2003 和 SPSS 10.0 对数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 Hg^{2+} 和 Pb^{2+} 单一及复合处理对野生型和栽培型绿豆种子发芽率的影响

种子的萌发情况直接关系到幼苗形态建成以及后期植株的生长发育。从表 2 可以看出,随着 Hg^{2+} 质量浓度增加,栽培型绿豆品种 P 的发芽率比其 CK 分别降低了 6.3%、7.4%和 16.0%,野生型绿豆品种 E 的发芽率比其 CK 分别降低了 5.1%、6.5%和 13.1%,各品种不同处理间差异均不显著。随着 Pb^{2+} 质量浓度增加,栽培型绿豆品种 P 的发芽率比其 CK 分别降低了 4.06%、5.93%和 12.68%,野生型绿豆品种 E 的发芽率比其 CK 分别降低了 1.9%、5.6%和 10.3%,各品种不同处理间差异均不显著。随着($\text{Hg}^{2+}+\text{Pb}^{2+}$)质量浓度增加,栽培型绿豆品种 P 的发芽率比其 CK 分别降低了 9.6%、16.3%和 25.8%,中(II)、高(III)质量浓度与 CK 相比差异极显著,野生型绿豆品种 E 的发芽率比其 CK 分别降低了 8.8%、12.6%和 22.4%,仅高质量浓度(III)与 CK 相比差异显著。说明 Hg^{2+} 、 Pb^{2+} 对栽培型品种 P 发芽的影响存在着协同效应。绿豆种子在 Hg^{2+} 、 Pb^{2+} 不同质量浓度处理下的发芽率有所降低,可能是这 2 种重金属对萌发期绿豆种子内淀粉酶、醇脱氢酶、蛋白酶、淀粉酶和酸性磷酸酯酶的活性产生抑制作用所致^[13]。

表 2 Hg^{2+} 和 Pb^{2+} 单一及复合处理下绿豆种子发芽率

%

品种	CK	Hg^{2+} 质量浓度			Pb^{2+} 质量浓度			($\text{Hg}^{2+}+\text{Pb}^{2+}$) 质量浓度		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
P	89.3aA	83.7aA	82.6aA	75.0aA	85.7aA	84.0aA	78.0aA	80.7abAB	74.7bcBC	66.3cC
E	71.3aA	67.7aA	66.7aA	62.0aA	70.0aA	67.3aA	64.0aA	65.0abA	62.3abA	55.3bA

注:同行大小写字母分别表示不同质量浓度 Hg^{2+} 、 Pb^{2+} 、($\text{Hg}^{2+}+\text{Pb}^{2+}$)与 CK 在 0.01 和 0.05 水平上的差异显著性,下同。

2.2 Hg^{2+} 和 Pb^{2+} 单一及复合处理对野生和栽培型绿豆幼苗生长的影响

由表 3 可见,种子萌发后根和苗的生长均受到 Hg^{2+} 、 Pb^{2+} 胁迫的显著影响。

随着 Hg^{2+} 质量浓度的增加,栽培型绿豆品种 P 苗高比其 CK 分别降低了 17.6%、26.3% 和 43.4%,差异达极显著水平;野生型绿豆品种 E 苗高比其 CK 分别降低了 12.4%、22.7% 和 39.2%,除低质量浓度(0.5 mg/L)外,其他质量浓度处理与 CK 相比差异均达极显著水平,且栽培型绿豆品种 P 苗高受 Hg^{2+} 胁迫的影响大于野生型 E 品种。随着 Hg^{2+} 质量浓度的增加,品种 P 根长的变化趋势同苗高,除低质量浓度(0.5 mg/L)外,其他质量浓度处理与 CK 相比差异均达极显著水平;野生型绿豆品种 E 根长变化趋势与栽培型绿豆品种 P 一致,且栽培型早熟绿豆王品种 P 根长受 Hg^{2+} 胁迫影响大于野生型品种 E。

随着 Pb^{2+} 质量浓度增加,栽培型绿豆品种 P 苗高比其 CK 分别降低了 16.3%、23.4% 和 37.8%,野生型绿豆品种 E 苗高比其 CK 分别降低了 10.1%、21.4% 和 34.4%;除低质量浓度(20 mg/L)

外,2 个品种其他质量浓度处理与各自 CK 相比差异均达极显著水平;随着 Pb^{2+} 质量浓度增加,2 个绿豆品种 P 和 E 根长受抑制程度逐渐增加,高质量浓度(100 mg/L)处理与各自 CK 相比差异均达极显著水平,且栽培型早熟绿豆王品种根长受 Pb^{2+} 胁迫影响大于野生型 E 品种。

从表 3 可以看出, ($\text{Hg}^{2+}+\text{Pb}^{2+}$) 的 3 种复合质量浓度处理下,栽培型绿豆品种 P 苗高比其 CK 分别下降 25.7%、34.8%、48.1%,野生型绿豆品种 E 苗高比其 CK 分别下降 22.1%、32.6%、44.7%,2 个品种与其 CK 相比均存在极显著差异,且栽培型绿豆品种 P 苗高受 ($\text{Hg}^{2+}+\text{Pb}^{2+}$) 的抑制作用大于野生型品种 E。栽培型品种 P 根长比其 CK 分别下降 23.1%、41%、79.7%,野生型绿豆品种 E 根长比其 CK 分别下降 22.3%、39.9%、70.0%,除低质量浓度[(0.2+20)mg/L]外,2 个品种其他质量浓度处理与各自 CK 相比均存在显著差异。栽培型绿豆品种 P 根长受 ($\text{Hg}^{2+}+\text{Pb}^{2+}$) 的抑制作用也大于野生型品种 E。从表 3 还可以看出, ($\text{Hg}^{2+}+\text{Pb}^{2+}$) 处理的苗高和根长都低于相应质量浓度的单一处理,说明 Hg^{2+} 、 Pb^{2+} 共存时,相互之间有促进作用。

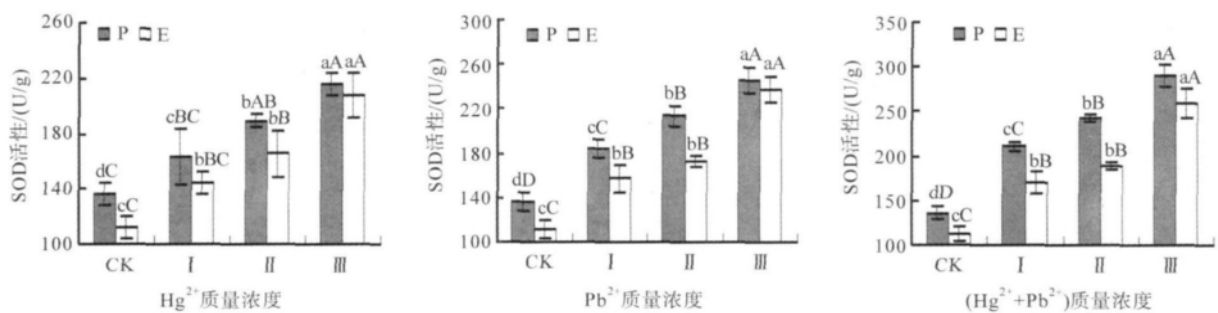
表 3 Hg^{2+} 、 Pb^{2+} 单一及复合处理对绿豆幼苗苗高和根长的影响

项目	品种	CK	Hg^{2+} 质量浓度			Pb^{2+} 质量浓度			($\text{Hg}^{2+}+\text{Pb}^{2+}$) 质量浓度		
			I	II	III	I	II	III	I	II	III
苗高/cm	P	13.19aA	10.87bB	9.71bB	7.46cC	11.04bAB	10.10bcBC	8.20cC	9.80bB	8.60bBC	6.84cC
	E	11.58aA	10.14abAB	8.95bBC	7.04cC	10.40abAB	9.10bBC	7.60cC	9.01bB	7.80cBC	6.40dC
根长/cm	P	5.07aA	4.06abAB	3.10bB	2.40cB	4.23abAB	3.47bcAB	2.83cB	3.90bAB	2.99cB	1.03dC
	E	4.84aA	4.08abAB	3.15bcAB	2.48cB	4.13abAB	3.44bAB	2.90bB	3.76abAB	2.91bBC	1.45cC

2.3 Hg^{2+} 和 Pb^{2+} 单一及复合处理对野生和栽培型绿豆 SOD 活性的影响

SOD 是细胞内自由基清除系统中一个关键性酶,在保护细胞器免遭活性氧损害中起至关重要的作用。由图 1 可知,在正常情况下(CK),野生型绿豆品种 E 的 SOD 活性低于栽培型绿豆品种 P,在 Hg^{2+} 、 Pb^{2+} 、($\text{Hg}^{2+}+\text{Pb}^{2+}$) 胁迫下,2 个品种 SOD 活性随重金属离子质量浓度的增加均呈上升趋势。高质量浓

度 Hg^{2+} 、 Pb^{2+} 、($\text{Hg}^{2+}+\text{Pb}^{2+}$) 胁迫下,栽培型绿豆品种 P 的 SOD 活性与其 CK 相比分别增加了 58.8%、80.4%、113.7%,野生型绿豆品种 E 的 SOD 活性与其 CK 相比分别增加了 85.7%、111.9%、131.0%。除低质量浓度 Hg^{2+} (0.5 mg/L) 处理外,2 个品种其他处理与各自 CK 相比差异均达极显著水平。在 Hg^{2+} 、 Pb^{2+} ($\text{Hg}^{2+}+\text{Pb}^{2+}$) 胁迫下,野生型绿豆品种 E 的 SOD 活性增幅大于栽培型绿豆品种 P,表明在受



图中大、小写字母分别表示同一品种数据在 0.01、0.05 水平上的差异显著性,下同
图 1 Hg^{2+} 和 Pb^{2+} 单一及复合处理对绿豆幼苗叶片中 SOD 活性的影响

到重金属离子 Hg^{2+} 、 Pb^{2+} 和 $(\text{Hg}^{2+} + \text{Pb}^{2+})$ 胁迫下,野生型绿豆品种 E 清除叶片内自由基的能力强于栽培型绿豆品种 P,具有较强的抗重金属离子 Hg^{2+} 、 Pb^{2+} 胁迫的能力。

2.4 Hg^{2+} 和 Pb^{2+} 单一及复合处理对野生型绿豆和栽培型绿豆 POD 活性的影响

POD 活性的维持和提高是植物耐受重金属胁迫的物质基础之一,它可以清除体内的 H_2O_2 。由图 2 可知,在正常情况下(CK),野生型绿豆品种 E 的 POD 活性低于栽培型绿豆品种 P,在 Hg^{2+} 、 Pb^{2+} 、 $(\text{Hg}^{2+} + \text{Pb}^{2+})$ 胁迫下,2 个栽培型绿豆品种 POD

活性随重金属离子质量浓度的增加均呈上升趋势。高质量浓度 Hg^{2+} 、 Pb^{2+} 、 $(\text{Hg}^{2+} + \text{Pb}^{2+})$ 胁迫下,栽培型绿豆品种 P 的 POD 活性与其 CK 相比分别增加了 239%、262%、304%,野生型品种 E 的 POD 活性与其 CK 相比增加了 261%、300%、333%。栽培型绿豆品种 P 各个处理与其 CK 相比差异均达极显著水平,而野生型品种 E 除低质量浓度 Hg^{2+} (0.5 mg/L)、低质量浓度 Pb^{2+} (20 mg/L) 处理外,其他处理与其 CK 相比差异均达极显著水平。在 Hg^{2+} 、 Pb^{2+} 、 $(\text{Hg}^{2+} + \text{Pb}^{2+})$ 胁迫下,野生型品种 E 的 POD 活性增幅大于栽培型绿豆品种 P。

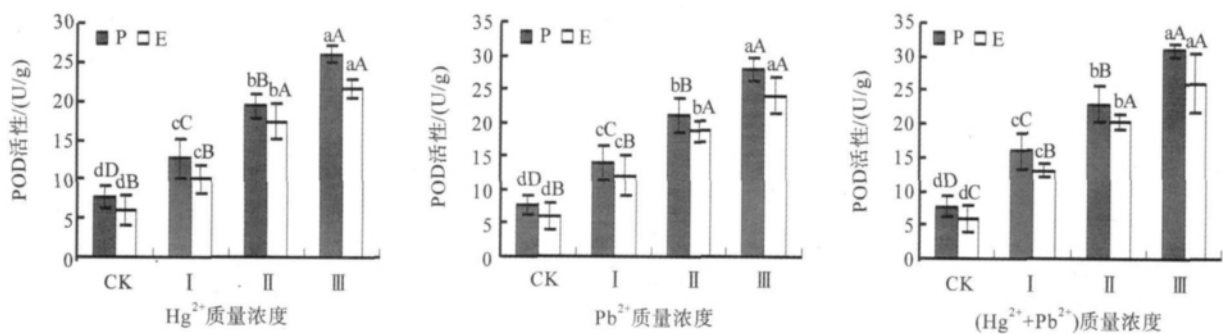


图 2 Hg^{2+} 和 Pb^{2+} 单一及复合处理对绿豆幼苗叶片中 POD 活性的影响

2.5 Hg^{2+} 和 Pb^{2+} 单一及复合处理对野生型绿豆和栽培型绿豆 CAT 活性的影响

CAT 是抗氧化酶系统的重要组成部分,与 SOD 共同作用能把植物体内存在潜在危害的自由基转化为无害的 H_2O 。由图 3 可知,在 Hg^{2+} 、 Pb^{2+} 、 $(\text{Hg}^{2+} + \text{Pb}^{2+})$ 胁迫下,2 个品种 CAT 活性随处理质量浓度的增加均呈上升趋势。高质量浓度 Hg^{2+} 、 Pb^{2+} 、 $(\text{Hg}^{2+} +$

$\text{Pb}^{2+})$ 胁迫下,栽培型绿豆品种 P 的 CAT 活性与 CK 相比分别增加了 220%、230%、254%,野生型绿豆品种 E 的 CAT 活性与其 CK 相比分别增加了 231%、246%、278%。栽培型绿豆品种 P 和野生型绿豆品种 E 各个处理与各自 CK 相比,差异均极显著。在 Hg^{2+} 、 Pb^{2+} 、 $(\text{Hg}^{2+} + \text{Pb}^{2+})$ 胁迫下,野生型绿豆品种 E 的 CAT 活性增幅大于栽培型绿豆品种 P。

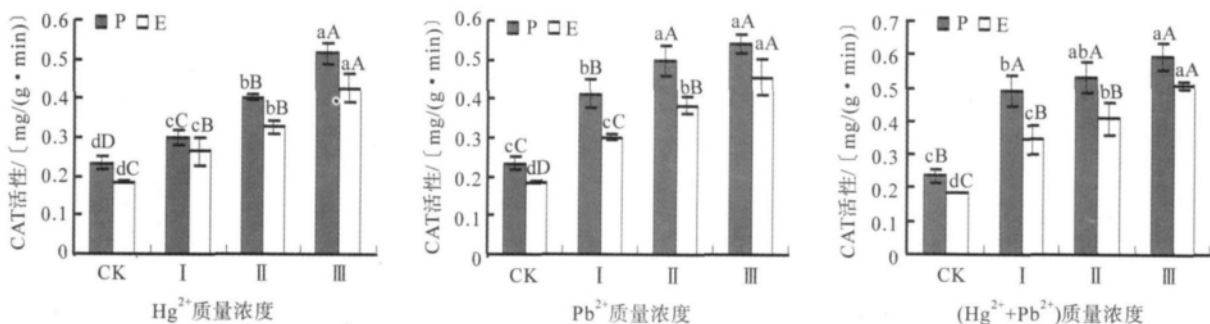


图 3 Hg^{2+} 和 Pb^{2+} 单一及复合处理对绿豆幼苗叶片中 CAT 活性的影响

3 结论与讨论

种子的萌发和幼苗的形态建成是作物生长的关键时期,种子发芽质量好坏直接影响农作物的生长和经济效益。本研究结果表明,不同质量浓度的重金属离子 Hg^{2+} 、 Pb^{2+} 单一处理对野生型绿豆品种 E 和栽培型绿豆品种 P 的种子萌发和幼苗生长产生

抑制作用,质量浓度越高,抑制作用越强。从试验结果还可以看出, Hg^{2+} 处理对 2 个绿豆品种的发芽率、幼苗的苗高和根长的抑制作用大于 Pb^{2+} 处理。与 CK 相比,重金属离子 $(\text{Hg}^{2+} + \text{Pb}^{2+})$ 复合处理不同程度地抑制绿豆生长,且表现出协同作用,其中高质量浓度 $(\text{Hg}^{2+} + \text{Pb}^{2+})$ 对 2 个品种的种子萌发和生长的抑制作用最强,可能是因为 Hg^{2+} 、 Pb^{2+} 作为

非必需元素,在植物体内累积到一定程度,会影响细胞分裂和生长,干扰营养物质的吸收和分配,从而影响绿豆种子的萌发,抑制绿豆生长和根系发育^[14-15]。

植物种间和种内对重金属离子 Hg^{2+} 和 Pb^{2+} 的耐受性也存在差异。本研究结果表明,不同绿豆品种种子萌发对 Hg^{2+} 、 Pb^{2+} 胁迫具有明显的耐性差异。绿豆品种间的耐性差异与其内源抗氧化酶系统的变化及膜脂过氧化程度密切相关。在逆境胁迫下,通常植物会产生具有高度反应性的活性氧自由基(ROS),ROS在细胞中引起生物膜的过氧化损伤,造成叶绿体与线粒体等细胞器的功能损害,最终导致细胞凋亡^[16]。SOD、POD和CAT等抗氧化酶是植物体内的自由基清除系统,它们能清除植物体内因各种胁迫而导致自由基代谢失衡后所产生的大量自由基,减轻自由基对生物膜系统所产生的伤害,保护生物膜不受破坏^[17-20]。当胁迫强度较轻时,植物体内的活性氧清除系统被激活,其产生的作用超过了活性氧对植物的损伤作用。但是随着胁迫强度的增加,保护酶系统逐渐被抑制,抗氧化酶系统内多种酶之间的活性比不平衡,细胞内多种功能膜被破坏,表现为生理代谢紊乱,直至细胞凋亡^[21]。本试验结果表明,一定质量浓度 Hg^{2+} 、 Pb^{2+} 胁迫下,野生型绿豆品种E和栽培型绿豆品种P的叶片中SOD、POD和CAT等保护酶的活性总体呈上升趋势,说明几种保护酶在受到 Hg^{2+} 、 Pb^{2+} 胁迫后出现某种程度的抗逆反应。这与 Hg^{2+} 、 Pb^{2+} 及 $(\text{Hg}^{2+}+\text{Pb}^{2+})$ 复合胁迫对植株幼苗生长的影响是一致的,说明幼苗生长的变化是植株体内整个保护酶系统与 Hg^{2+} 、 Pb^{2+} 单一胁迫和复合胁迫相抗衡的结果。

本结果研究表明, Hg^{2+} 、 Pb^{2+} 单一胁迫和复合胁迫对栽培型绿豆品种P的伤害作用大于野生型绿豆品种E, $(\text{Hg}^{2+}+\text{Pb}^{2+})$ 复合胁迫对栽培型绿豆品种P和野生型绿豆品种E造成的伤害作用大于 Hg^{2+} 、 Pb^{2+} 单一胁迫,同时重金属 Hg^{2+} 对2个绿豆品种造成的伤害作用大于重金属 Pb^{2+} 。重金属离子对植物的影响是复杂的、多方面的,不同重金属离子可能有不同的作用部位和作用方式,而相同的重金属离子又因作用于植物不同生长发育时期或作用于不同植物而有所差别。自然环境中通常是几种重金属离子的复合污染,它们的相互作用可能存在拮抗或协同效应,更增加了反应的复杂性^[22],这都需要进行深入细致的研究与探讨。

参考文献:

[1] 魏明宝,胡波,郝法政,等. 络合剂对转基因印度芥菜修复重金属污染土壤的影响[J]. 河南农业科学,2011,40(6):85-84.

- [2] 夏来坤,郭天财,康国章,等. 土壤重金属污染与修复技术研究进展[J]. 河南农业科学,2005(5):88-92.
- [3] 张杰,谢英荷,李廷亮,等. 重金属元素铅对茄果类蔬菜生长状况及品质的影响[J]. 山西农业科学,2010,38(4):18-20,27.
- [4] 谢影,鲁先文,卜利波. 重金属 Pb、Cr 对小麦种子萌发和幼苗生物量的影响[J]. 天津农业科学,2009,15(1):22-24.
- [5] 李廷亮,谢英荷,刘子娇. Cd、Cr、Pb 对几种叶类蔬菜生长状况及品质的影响[J]. 山西农业科学,2008,36(4):20-22.
- [6] 郭锋,樊文华. Hg、Cr 和 Pb 污染对绿豆种子萌发及幼苗生长发育的影响[J]. 种子,2008,27(9):34-37.
- [7] 聂小琴,丁德馨,李广悦,等. 铀矿浸出液胁迫对绿豆种子萌发和幼苗生长及其抗氧化酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报,2009,28(4):789-795.
- [8] 韩金龙,王同燕,徐立华,等. 铅胁迫对糯玉米幼苗叶片叶绿素含量及抗氧化酶活性的影响[J]. 华北农学报,2010,25(8):121-123.
- [9] 郭锋,樊文华. 土壤 Hg、Cr 和 Pb 单一污染对绿豆光合作用的影响[J]. 华北农学报,2009,24(1):26-30.
- [10] 朱纯,鲁先文. Pb、Cd 单一及复合污染对小麦种子萌发和幼苗毒害作用[J]. 安徽农学通报,2010,16(15):26-30.
- [11] 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,2003.
- [12] 刘萍,李明军. 植物生理实验技术[M]. 北京:科学出版社,2008.
- [13] 孔祥海. 重金属离子对植物的毒害及其机理[J]. 龙岩学院学报,2005,23(3):83-87.
- [14] 周东美,王玉军,仓龙,等. 土壤及土壤-植物系统中复合污染的研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备,2005,5(10):1-8.
- [15] 朱红霞,陈效民,葛才林. 重金属复合污染对小麦幼苗生长的影响[J]. 生态环境,2006,15(3):543-546.
- [16] 王玮玮,李桂祥,王亦佳,等. 重金属离子镉(Cd)胁迫对苜蓿组织的影响研究[J]. 现代农业科技,2009(9):22-23.
- [17] 吴济南,王丽玲,王惟帅,等. 阿特拉津和乙草胺混用对夏玉米叶片生理指标的影响[J]. 河南农业科学,2011,40(8):142-144.
- [18] 郑世英,张秀玲,王丽燕,等. Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 胁迫对棉花保护酶及丙二醛含量的影响[J]. 河南农业科学,2007(8):43-45,63.
- [19] 孙成芬,马丽,盛连喜,等. 土壤苯污染对玉米苗期生长和生理的影响[J]. 农业环境科学学报,2009,28(3):443-448.
- [20] 王红星,纪秀娥,陈晓君,等. 水杨酸对废电池胁迫下绿豆幼苗抗氧化酶活性及生理特性的影响[J]. 农业环境科学学报,2011,30(3):429-434.
- [21] 高大翔,刘惠芬,刘卉生,等. 汞胁迫对小麦种子萌发、幼苗生长及生理生化特性的影响[J]. 农业环境科学学报,2005,24(增刊):13-17.
- [22] 孔德政,裴康康,李永华,等. 铅、镉和锌胁迫对荷花生理生化的影响[J]. 河南农业大学学报,2010,44(4):402-407.