

As 对谷子萌发、幼苗生长及抗氧化酶系统的影响

王春梅^{1,2}, 闫双堆^{1,2}, 卜玉山¹, 刘利军³, 张乃于^{1,2}

(1. 山西农业大学资源环境学院, 山西 太谷 030801; 2. 山西农业大学生物工程研究所, 山西 太谷 030801; 3. 山西省环境科学研究院, 太原 030027)

摘要: 为探究 As 对谷子苗期生长的影响及谷子生长的临界浓度, 设置 As 浓度梯度分别为 0, 2, 4, 8, 10 mg/kg, 以石英砂为基质, 通过培养试验, 分析探讨不同浓度 As 对谷子萌发、苗期生长与抗氧化酶系统的影响。研究表明: 低浓度的 As (<4 mg/kg) 促进谷子萌发, 高浓度的 As (≥ 4 mg/kg) 抑制谷子萌发。当 As 浓度为 2 mg/kg 时, 谷子的发芽势、发芽率和发芽指数在所有处理中最高, 其值分别为 18.67%, 32.00% 和 19.00%。低浓度的 As 对谷子幼苗生长有促进作用, 高浓度对其有抑制作用, 当 As 浓度为 2 mg/kg, 谷子的株高、根长和地上部鲜重与地下部鲜重都达到最大值, 分别为 15.46, 7.34 cm 和 0.64, 0.16 g, 随着 As 浓度梯度增加, 地下部鲜重/地上部鲜重先增加后降低, As 对根系的促进与抑制作用大于地上部, 谷子幼苗根部的 As 含量均明显高于地上部, 且 TF 值逐渐减小; 当 As 浓度 <4 mg/kg 时, As 能促进谷子叶绿素的合成, 在 As 浓度为 2 mg/kg 时, 谷子的叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素总量显著高于对照 28.38%, 51.60%, 37.06%, As 浓度高于 4 mg/kg 时, 谷子的叶绿素合成受到抑制; 随着 As 浓度梯度的增加, 谷子幼苗的 SOD 活性不断增强, POD 与 CAT 活性呈先增加后减小的趋势, 但均高于对照, As 浓度 >4 mg/kg 后, CAT 活性开始减小; As 浓度 >8 mg/kg 后, 谷子幼苗的 POD 活性开始减小, 表明低浓度的 As (<4 mg/kg) 对谷子萌发及幼苗生长有促进作用, 高浓度的 As (≥ 4 mg/kg) 抑制谷子萌发和幼苗生长, 且根系对 As 胁迫的反应更为敏感, 抗氧化酶系统 (POD 和 CAT) 活性降低。研究可为谷子的抗污染栽培和无公害生产提供科学依据。

关键词: As; 谷子萌发; 幼苗生物量; As 含量; 叶绿素; 抗氧化特性

中图分类号: O613.63; S515 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)06-0352-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.06.051

Effect of As Stress on Millet Germination, Seedling Growth and Antioxidant System

WANG Chunmei^{1,2}, YAN Shuangdui^{1,2}, BU Yushan¹, LIU Lijun³, ZHANG Naiyu^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801;

2. Institute of Bioengineering, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801;

3. Shanxi Academy of Environmental Science, Taiyuan 030027)

Abstract: To investigate the effect of arsenic on the growth of millet seedlings and the critical concentration of millet stress, the As concentrations were set to 0, 2, 4, 8, 10 mg/kg for quartz sand. Substrates, through cultivation and pot experiments, analyzed the effect mechanism of As on the germination, seedling growth and antioxidant enzyme system of millet. Studies have shown that: Low concentrations of As (<4 mg/kg) can promote millet germination, high concentrations of As (≥ 4 mg/kg) inhibit millet germination, when the As concentration of 2 mg/kg, the millet germination potential, germination rate and germination index in all treatments the highest value. They were 18.67%, 32.00%, and 19.00%, respectively. The low concentration of As promoted the growth of millet seedlings, and the high concentration had an inhibitory effect. When the As concentration was 2 mg/kg, the plant height, root length, fresh shoot weight, and under ground fresh weight of millet were all reached. The maximum values were 15.46 cm, 7.34 cm, 0.64 g, and 0.16 g, respectively. As the concentration gradient of As increased, the fresh weight of the under

收稿日期: 2018-07-07

资助项目: 山西省自然科学基金面上项目(201601D102052)

第一作者: 王春梅(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事作物土壤互作调控研究。E-mail: 861905346@qq.com

通信作者: 闫双堆(1976—), 女, 副教授, 主要从事作物土壤互作调控研究。E-mail: ysdllj@126.com

ground layer increased first and then decreased, and the promotion and inhibition of the root system was greater than that of the shoot. The content of As in the roots of millet seedlings was significantly higher than in the shoots, and the TF value gradually decreased. When As concentration was less than 4 mg/kg, As could promote the synthesis of chlorophyll in millet. When As concentration was 2 mg/kg, the total amount of chlorophyll a, chlorophyll b and chlorophyll in millet was significantly higher than that of the control 28.38%, 51.60% and 37.06%, when the concentration of As was higher than 4 mg/kg, the chlorophyll synthesis of Millet was inhibited; with the increase of As concentration gradient, the SOD activity of millet seedlings continued to increase, and the activities of POD and CAT increased first and then decreased, but higher than the contro. When the As concentration exceeded 8 mg/kg, the POD activity of the millet seedlings began to decrease. After the As concentration exceeded 4 mg/kg, the CAT activity began to decrease. After As concentration higher than 8 mg/kg, the POD actibvity of millet seedlings began to decrease. The results showed that low concentration of As (<4 mg/kg) promoted the germination and seedling growth of millet, and the high concentration of As (≥ 4 mg/kg) inhibited the germination and seedling growth of millet, and the root system was more sensitive to As stress, and the activity of antioxidant enzyme system (POD, CAT) was reduced. The research can provide a scientific basis for the anti-pollution cultivation and pollution-free production of millet.

Keywords: As; millet germination; seedling biomass; As content; chlorophyll; antioxidant properties

中国是受砷(As)危害最严重的国家之一,国内的湖北、山西和内蒙古等地均存在不同程度的 As 污染,山西省尤为重灾区^[1]。砷在可食植物中的超量累积已对人们的健康构成了严重的威胁^[2]。目前国内外已经展开了一系列关于砷对植物生理的研究^[3-4],丁枫华等^[5]研究了 8 个科 19 种常见蔬菜幼苗在砷胁迫下生长性状敏感性的差异,结果表明,砷对大部分蔬菜存在一个较低浓度(0.1,1.0 mg/L)的刺激效应和高浓度(10 mg/L)的抑制效应。高浓度的砷会对植物的生长发育产生较严重的影响,其毒害作用主要表现在抑制根系的活性、细胞生长和光合作用,阻碍植物对养分的吸收和运输等。Khan 等^[6]研究了 0, 5, 25 $\mu\text{mol/L}$ 砷处理下印度芥菜(*Brassica juncea*)的生长情况,发现印度芥菜在 25 $\mu\text{mol/L}$ 砷胁迫下受到明显的毒害作用;万梦雪等^[7]研究表明,1 mg/kg 低质量分数的砷盐对绿豆与黑豆种子萌发质量均有一定的促进作用,大约可提高 12%,超出 5 mg/kg 时,则表现出明显的抑制作用;巩健^[8]研究发现,低质量浓度(5 mg/L)砷离子对黄瓜种子发芽率和发芽势等有一定促进作用,当砷离子质量浓度超出 10 mg/L 时,黄瓜种子萌发受到显著的抑制作用,可见不同作物对砷浓度的反应不同。砷对植物叶绿素影响方面的研究有很多报道,刘全吉等^[9]研究认为,较低浓度砷对叶绿素合成影响不明显,而高砷浓度导致叶绿素含量显著下降;Azizur 等^[10]的试验表明,水稻叶片叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量均随着土壤砷浓度升高而显著降低;徐玲玲等^[11]对紫茉莉的研究发现,超氧化

物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)活性均随着砷浓度的升高,表现为先升后降的趋势,说明紫茉莉对低浓度的砷胁迫具有一定的耐受性。大量研究^[12]已经证实,As 通过影响植物水分代谢、光合作用和抗氧化系统等进而影响其生长,微量砷对作物具有一定的生长刺激作用^[13],但过量的 As 会激发一系列抑制作物生长的反应,干扰作物光合作用和呼吸系统,而植物通过超积累和抗氧化防御系统等机制响应砷的胁迫^[14]。

山西省是我国小杂粮的重要产地,谷子种植面积基本维持在 20 万 hm^2 ,约占全省粮食总产量的 1.8%^[15],谷子种植在山西农业和农村经济发展中起着重要作用。虽然目前关于 As 对作物生长的影响已有大量的研究报道,但主要集中在小麦^[8-16]、水稻^[17]、玉米^[18]等大宗作物上,而谷子只是区域重要性作物,关于外源 As 胁迫对谷子生长的影响及临界浓度的研究尚未见报道。鉴于此,本试验以“晋谷 21 号”(Setaria italica)为材料,通过研究外源砷对谷子萌发、幼苗生长、叶绿素和抗氧化活性的影响,初步探究谷子耐砷机制,进而明确砷对谷子生理胁迫的临界浓度范围,为砷污染作物危害机理及其在不同农业生态系统中可能造成的不良影响提供理论支持,进而为优质安全生产中砷的控制、谷子的抗污染栽培和无公害生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为“晋谷 21 号”谷子(*Setaria italica*),

砷标准贮备液,用 $\text{Na}_3\text{AsO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 配制,使用时再用去离子水稀释成所需的浓度系列。

1.2 试验设计与方法

1.2.1 不同 As 浓度发芽培养试验 培养试验在山西农业大学资源环境学院实验室进行,于 2017 年 12 月 1 日精选当年饱满度一致、大小均匀、无病虫害的种子 100 粒,用 0.1% HgCl_2 表面消毒 6 min,去离子水充分冲洗后,在直径为 10 cm 的培养皿中放入与皿底大小相同的滤纸 2 张,平铺 50 g 石英砂,设置 5 个处理,对应加入 0, 2, 4, 8, 10 mg/L 的 As 溶液 10 mL,每个处理设 3 个重复,置于全智能人工植物气候箱($(25 \pm 2)^\circ\text{C}$, $(75 \pm 7)\%$ RH, 6 000 lx)中培养。培养期间,每天上午 8:00 和下午 7:00 各处理中添加 10 mL 的蒸馏水,以保持滤纸湿润。胚芽长度为种子半径时开始统计发芽数,每 12 h 调查 1 次发芽情况,连续 3 天记录发芽数无变化视为发芽结束。培养 4 天后,统计发芽势,培养 7 天时,统计发芽率。

$$\text{发芽势}(Ge) = n/N \times 100\%$$

式中: n 为第 4 天发芽数; N 为种子总数。

$$\text{发芽率}(Gr) = n/N \times 100\%$$

式中: n 为第 7 天发芽数; N 为种子总数。

$$\text{发芽指数} = \sum(Gt/Dt)$$

式中: Gt 为不同发芽时间的发芽率(%); Dt 为不同的发芽试验天数(d)。

1.2.2 不同 As 浓度的砂培盆栽试验与采样 盆栽试验在山西农业大学资源环境学院实验室进行,2017 年 12 月 9 日播种,每盆播种 20 粒谷子,用高 15 cm, 体积为 2 L 的黑色塑料盆钵作为盆栽钵体,每盆装石英砂 1 kg,用 $\text{Na}_3\text{AsO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 配制成 As 浓度为 0, 2, 4, 8, 10 mg/kg 的各处理,每个处理重复 3 次,并在盆钵底衬有塑料盒,每天向各盆中加入 100 mL 去离子水,每隔 5 天向各盆中添加 50 mL 霍格兰营养液,保证充足的养分和水分。置于全智能人工植物气候箱($(25 \pm 2)^\circ\text{C}$, $(75 \pm 7)\%$ RH, 6 000 lx)中培养,每天光照 14 h,白天温度 25°C ,夜间 20°C ,相对湿度 75%,12 月 23 号两叶期间苗,每盆保留 8 株,处理 28 天后,于 1 月 6 日进行收获,先将砂培谷子幼苗连根小心取出,轻轻除去根部石英砂,用去离子水冲洗,滤纸吸干,称取整株鲜质量,并用陶瓷剪刀将谷子剪为地上部和地下部,一部分鲜样用于测定相关生理指标,另一部分装于信封内,放入烘箱(105°C 杀青 30 min, 60°C 烘干 24 h)烘干后,用于砷含量的测定,并于 1 月 8 号开始室内试验分析。

1.2.3 测定方法 As 含量的测定:将烘干的谷子幼

苗分为地上、地下两部分,研磨,分别称取 0.1 g,经 4 : 1 HNO_3 — HClO_4 消化,去离子水定容后用原子荧光分光光度计(AFS-2100 型)测定各样品中的 As 含量(mg/kg)^[17]。

转移系数(TF)=地上部 As 含量/根部 As 含量

叶绿素的测定采用 80%丙酮浸提比色法,在谷子培养 28 天时测量,用分光光度计测 663, 645, 652 nm 的吸光度,根据公式计算叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素总量^[19]。采用氮蓝四唑(NBT)光还原法测定 SOD 活性^[19],采用愈创木酚法测定 POD 活性^[19],采用碘量滴定法测定 CAT 活性^[19]。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 软件作图,DPS 7.05 软件进行数据分析,LSD 法进行差异显著性检验,显著水平为 $p < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同浓度 As 对谷子萌发的影响

种子萌发期是植物生命周期中最脆弱而又最早遭受土壤重金属伤害的时期,是植物重要的生理过程之一^[20],发芽率、发芽势和发芽指数是衡量农作物种子发芽能力的重要指标^[21]。由表 1 可知,在 As 浓度为 2 mg/kg 时,发芽势、发芽率和发芽指数最高,分别高于对照 10.71%, 18.75% 和 14.05%,但差异不显著($p > 0.05$);在 As 浓度为 4 mg/kg 时,与对照相比,种子的发芽势、发芽率和发芽指数基本无差异,说明当 As 浓度 < 4 mg/kg 时,低浓度的砷促进了种子的生理活动,从而使其对谷子萌发有促进作用;当 As 含量为 8, 10 mg/kg 时,谷子的发芽势、发芽率和发芽指数显著低于对照($p < 0.05$),8 mg/kg 时分别下降了 72%, 79.5% 和 71%, 10 mg/kg 时分别下降了 84%, 87% 和 82%,这表明当 As 浓度 ≥ 4 mg/kg 时,As 对谷子萌发有显著抑制作用。

表 1 不同浓度 As 对谷子发芽的影响

As 浓度/ (mg · L ⁻¹)	发芽势/%	发芽率/%	发芽指数
0	33.34 ± 0.03a	52.00 ± 0.07a	16.33 ± 0.02a
2	37.34 ± 0.10a	64.00 ± 0.13a	19.00 ± 0.08a
4	32.00 ± 0.00a	52.00 ± 0.03a	17.00 ± 0.02a
8	9.34 ± 0.03b	10.66 ± 0.03b	4.67 ± 0.03b
10	5.34 ± 0.01b	9.99 ± 0.01b	3.00 ± 0.01b

注:表中数据为平均值 ± 标准差;不同小写字母表示处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

2.2 不同浓度 As 对谷子幼苗生长的影响

2.2.1 不同浓度 As 对谷子幼苗株高和根长的影响 图 1 为不同 As 浓度对谷子株高和根长的影响,

整体趋势表现为随着 As 浓度的增加,谷子的株高和根长呈先增加后减小的趋势。当 As 浓度为 2 mg/kg 时,谷子的株高在所有处理中最高,其值为 15.46 cm,高于对照 5.63%,说明低浓度的 As (<4 mg/kg) 对谷子幼苗生长有一定促进效应。当 As 浓度 ≥ 4 mg/kg 谷子的株高呈降低趋势,As 浓度为 4 mg/kg 时低于对照 18.23%,相比 As 浓度为 2 mg/kg 显著减少了 22.83%,As 浓度为 8,10 mg/kg 时分别低于对照 43.04%和 55.31%,且差异显著 ($p < 0.05$)。除了 As 浓度为 2 mg/kg 谷子根长大于对照外,其他处理均低于对照,与对照相比,当 As 浓度超过 2 mg/kg 时,谷子根长下降 7.29%~38.30%。其中 As 浓度为 8,10 mg/kg 的根长下降最为显著 ($p < 0.05$),分别下降 31.91%和 38.30%,说明砷浓度 < 4 mg/kg 时对谷子的株高和根长有促进作用,随着 As 浓度的升高,超过 4 mg/kg 时,会对其产生抑制作用。

2.2.2 不同浓度 As 对谷子幼苗地上和地下部生物量的影响 从表 2 可以看出,As 浓度 < 4 mg/kg 时,与对照相比,谷子的地上部鲜重和地下部鲜重都有不同程度的增加,其值分别高于对照 4.69%和 43.75%,说明低浓度 As 可以促进谷子的苗期生长。与对照相比,As 浓度为 4,8,10 mg/kg 时,谷子的地上部鲜重和地下部鲜重均显著降低 ($p < 0.05$),地上部鲜重的值分别低于对照 55.74%,73.77%和 77.05%;地下部

鲜重分别低于对照 22.22%,55.56%和 66.67%,表明当 As 浓度 ≥ 4 mg/kg 时抑制谷子苗期生长。由表 2 可知,随着 As 浓度的增加,地下部鲜重/地上部鲜重呈先增加后降低的趋势,且均高于对照,说明 As 对根系的促进与抑制作用均大于地上部。

2.2.3 不同浓度 As 在谷子幼苗体内的转移与分布

由表 3 可知,在不同浓度 As 处理下,谷子幼苗地上部和地下部 As 含量随着 As 处理浓度的升高逐渐增加,均与对照差异显著 ($p < 0.05$)。在所有 As 处理浓度范围内,幼苗地下部的 As 含量均明显高于地上部,表明 As 进入谷子幼苗体内主要积累在地下部。随着 As 处理浓度的升高,谷子幼苗的转移系数 TF 值逐渐减小,且明显低于对照,说明随着 As 浓度的升高,As 由根部向地上部转运能力逐渐减弱。这与孙亚莉等^[21]对苗期水稻砷吸收转运的研究结果基本一致。

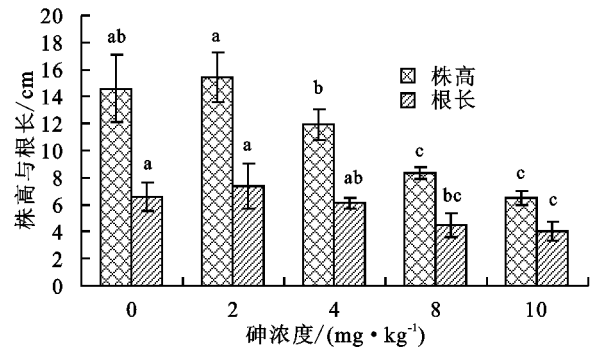


图 1 不同 As 浓度对谷子根长和株高的影响

表 2 不同浓度 As 对谷子地上部和地下部生物量的影响

As 浓度/ (mg·kg ⁻¹)	地上部		地下部		地下部鲜重/ 地上部鲜重
	单盆鲜重/g	与对照相比/%	单盆鲜重/g	与对照相比/%	
0	0.61±0.07a	—	0.09±0.01b	—	0.15±0.03b
2	0.64±0.10a	+4.69	0.16±0.04a	+43.75	0.24±0.03a
4	0.27±0.03b	-55.74	0.07±0.01bc	-22.22	0.25±0.04a
8	0.16±0.03bc	-73.77	0.04±0.02cd	-55.56	0.23±0.06ab
10	0.14±0.02c	-77.05	0.03±0.01d	-66.67	0.17±0.07ab

表 3 不同浓度 As 在谷子幼苗体内的吸收、转运

As 浓度/ (mg·L ⁻¹)	地上部砷含量/ (mg·kg ⁻¹)	地下部砷含量/ (mg·kg ⁻¹)	转移 系数 TF
0	0.31±0.03d	3.52±0.04e	0.088
2	1.53±0.47c	25.50±0.69d	0.060
4	4.29±0.76bc	85.81±0.83c	0.049
8	6.72±0.52ab	224.62±0.75b	0.029
10	8.73±0.82a	463.71±0.93a	0.019

2.3 不同浓度 As 对谷子幼苗叶绿素含量的影响

从图 2 可以看出,不同 As 浓度处理下叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素总量整体趋势表现为随着 As 浓度的增加呈先增加后降低的趋势。As 浓度为 2 mg/kg 时叶绿素 a 含量达到峰值,高于对照 28.38%,但差异不显著;当 As 浓度超过 2 mg/kg 时叶绿素 a 含量开始

下降,但在 As 浓度为 4 mg/kg 仍高于对照 19.70%;当 As 浓度达到 8,10 mg/kg 时,叶绿素 a 分别低于对照 13.21%和 15.10%。当 As 浓度为 2 mg/kg 时叶绿素 b 含量显著高于对照 ($p < 0.05$),并高于其他加砷处理,As 浓度 ≥ 4 mg/kg 时叶绿素 b 含量开始下降,As 浓度为 4,8 mg/kg 时,叶绿素 b 含量虽呈下降趋势,但仍分别高于对照 25.64%和 9.30%,As 浓度为 10 mg/kg 时,叶绿素 b 含量低于对照 3.40%,但差异不显著。As 浓度为 2 mg/kg 时叶绿素总量高于对照 37.06%,且差异显著 ($p < 0.05$),当 As 浓度为 4 mg/kg 虽呈下降趋势但仍高于对照 29.69%,当 As 浓度达到 8,10 mg/kg 时,与对照相比差异不显著,分别低于对照 7.78%和 6.67%。总体而言,随着 As 浓度的增加,三者的变化规律一致,均

呈先增加后降低的趋势,说明低浓度的 As (<4 mg/kg) 能促进叶绿素的合成,而当 As 浓度 ≥ 4 mg/kg, 会抑制谷子幼苗叶绿素的合成。

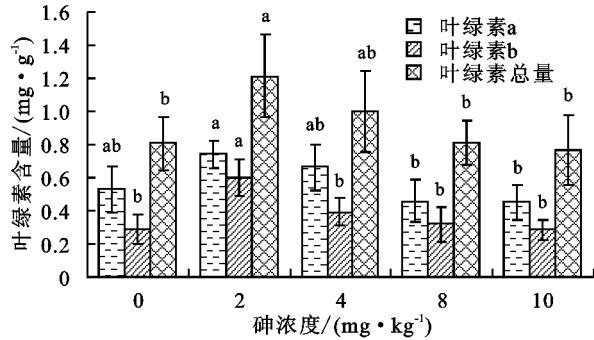


图 2 不同 As 浓度对谷子叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素总量的影响

2.4 不同浓度 As 对谷子幼苗 SOD 活性的影响

从图 3 可以看出,随着 As 浓度的增加,谷子幼苗的 SOD 活性呈增加趋势,且各处理均高于对照 1.34%~8.11%。As 浓度为 2 mg/kg 时,高于对照 6.28%,但差异不显著;当 As 浓度达到并超过 4 mg/kg 时,其值分别显著高于对照 1.34%,8.11%和 5.48% ($p < 0.05$),说明随着 As 浓度的增加,可以诱导谷子幼苗体内 SOD 活性的增加以消除 As 的毒害作用。

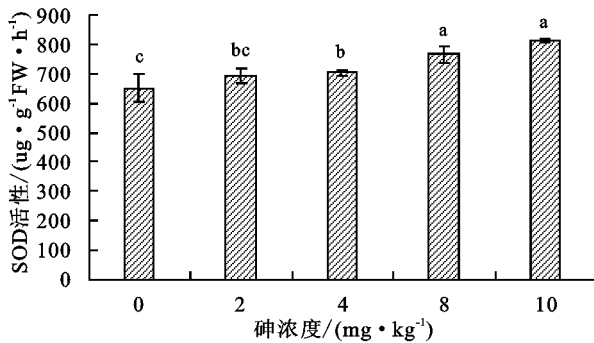


图 3 不同 As 浓度处理 SOD 活性

2.5 不同浓度 As 对谷子幼苗 POD 活性的影响

从图 4 可以看出,随着 As 浓度的增加,谷子幼苗 POD 活性呈先增加后降低的趋势,As 浓度为 2 mg/kg 时,比对照增加 1.78%,但差异不显著;As 浓度为 4,8 mg/kg 时,与对照相比显著增加 17.52%和 25.45% ($p < 0.05$);As 浓度为 10 mg/kg 时,谷子幼苗 POD 活性降低,但仍显著高于对照 5.65% ($p < 0.05$),并高于 As 浓度为 2,4 mg/kg 谷子幼苗 POD 活性,其值分别增加 21.22%和 5.65%,说明在低浓度范围内,随着 As 浓度的提高,谷子幼苗 POD 活性不断增强,但超过一定浓度范围,会抑制其活性。另外谷子幼苗 POD 活性的变化规律不同于 SOD 活性的变化,POD 活性呈先增加后降低的趋势,而 SOD 活性一直呈增加的趋势。

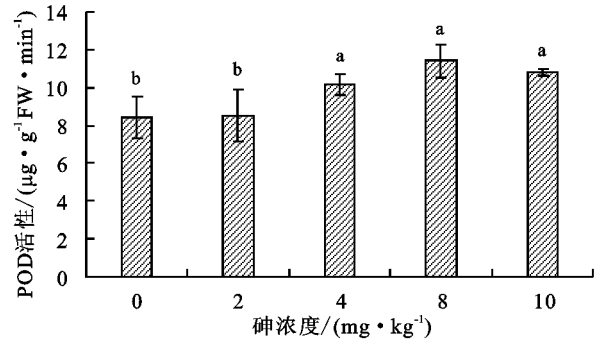


图 4 不同 As 浓度处理 POD 活性

2.6 不同浓度 As 对谷子幼苗 CAT 活性的影响

从图 5 可以看出,谷子幼苗 CAT 活性随着 As 浓度的增加,呈先增加后减小的趋势,且所有处理的 CAT 活性均高于对照,其值分别为 48.05%,54.56%,47.06%和 41.78%。As 浓度为 0~4 mg/kg 时,其活性呈增加的趋势;As 浓度为 4~10 mg/kg 时,呈逐渐降低趋势。As 浓度为 4 mg/kg 时,谷子幼苗 CAT 活性在所有处理中最高,且高于对照 54.74%,说明当 As 浓度 ≤ 4 mg/kg 时谷子幼苗 CAT 活性不断增强,但当 As 浓度 > 4 mg/kg,会抑制其活性,与谷子幼苗的 POD 活性变化规律相同。

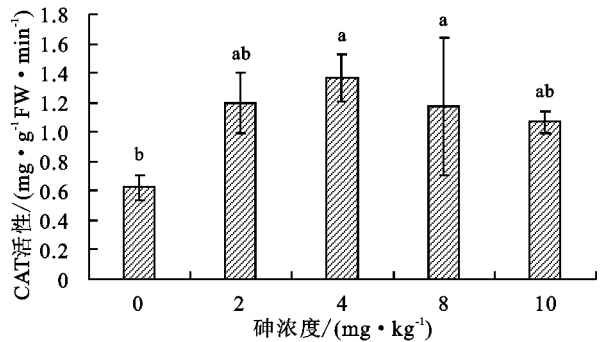


图 5 不同 As 浓度处理 CAT 活性

3 讨论

通过施加外源 As 选择谷子的生理指标,探寻不同浓度 As 胁迫条件对种子萌发和幼苗生长的影响,结果发现低浓度 (<4 mg/kg) As 处理促进谷子种子的发芽率、发芽势和发芽指数,这主要是因为低浓度的砷能打破种子的休眠,提高种子活力。但随着 As 浓度的增高 (≥ 4 mg/kg),谷子种子的发芽率、发芽势和发芽指数受到抑制,这与体内酶活性有关,由于蛋白酶等活性受到抑制,影响了种子内蛋白和淀粉的分解,进而影响到种子萌发所必需的物质和能量,使种子萌发受到抑制^[22]。万梦雪等^[7]研究结果也表明,低浓度(1 mg/kg)的砷对绿豆与黑豆种子萌发均有一定的促进作用;高浓度(> 5 mg/kg)则表现出明显的抑制作用。同时低浓度 (<4 mg/kg) As 会促进谷子幼苗的生长,且对根系的促进作用大于地上部,

这是因为根部作为植物与环境接触的重要界面,根相对于茎叶等部位对环境更为敏感,更易对环境做出反应,植物通过根系将重金属吸收进入根细胞内,并通过细胞间的运输向地上部转移^[23],这与刘拥海等^[24]对荞麦的试验研究一致,即低浓度对荞麦根的生长表现出一定的促进效应。随着As浓度的增高,谷子幼苗根部As含量明显高于地上部As含量,且TF值越来越小,这可能是由于根蛋白巯基与As结合将其沉淀于根中,阻碍其向地上部转移,因此,虽然根部对As具有较强的吸收与积累能力,但只有少量的As被转运至地上部分^[17]。随着砷浓度的增加,最终谷子幼苗生长会受到抑制,且对根系的抑制作用大于地上部,主要是因为随着砷浓度的升高会危害植物根系,使得谷子幼苗根尖细胞有丝分裂明显减少,分裂速度减慢,造成根系生理代谢失调,吸收能力减弱,导致营养亏缺,进而影响植株地上部生长和生物量积累^[25]。有研究^[26]表明,用亚砷酸盐水培日本小菘菜也证明低浓度的砷能促进生长,高浓度的砷会抑制生长。即重金属对植物种子萌发和幼苗生长的影响,一般存在一个较低浓度下的刺激效应和较高浓度下的抑制效应,这与本试验的研究结果相似。

叶绿素是植物进行光合作用的色素,其含量的多少是反映植物叶片光合能力的一个重要指标。其中叶绿素a的主要功能是将汇聚的光能转变为化学能进行光化学反应,叶绿素b主要是收集光能。本试验结果表明,As对谷子叶绿素含量的影响随As浓度的不同而变化,低浓度会促进谷子叶绿素的合成,这是因为低浓度的As不会对叶绿体功能造成损害,反而会促进谷子的光合作用,这与袁霞等^[27]在小青菜试验中的结果相似;As浓度高于4 mg/kg时,谷子的叶绿素合成受到抑制,这是因为砷可与酶蛋白的-SH基或其他侧链结合,取代Fe、Mg和Zn等离子,抑制一系列与叶绿素合成有关酶的活性,影响叶绿素合成的前体物质的形成^[28],这与肖志华等^[23]和赵秀峰等^[29]在谷子、小白菜试验中的结果相似。

As毒害可通过多种途径诱发活性氧的积累,而活性氧的有效清除是植物适应逆境胁迫的重要机制之一。本试验中,随着As浓度增加,谷子幼苗的SOD活性不断增强,说明谷子幼苗通过提高SOD活性来抵御砷胁迫危害,这是因为SOD是唯一以氧自由基为底物的酶,As胁迫下SOD可以淬灭谷子幼苗中超氧负离子 O_2^- ,终止由 O_2^- 启动的一系列自由基连锁反应所造成的对谷子的毒害损伤^[19]。SOD活性不断增强,是因为本试验中的砷没有达到破坏谷子

苗期的SOD酶反应系统的浓度,而刺激SOD酶反应系统产生更多的SOD活性。随着As浓度的增加,POD与CAT活性先增加后降低,但均高于对照,说明谷子可以通过POD和CAT氧化系统来响应As的胁迫作用。As浓度超过8 mg/kg后,谷子幼苗的POD活性开始减小;As浓度超过4 mg/kg后,CAT活性开始减小,这可能是其干扰了POD与CAT的分子结构或产生的活性氧自由基超过了其清除能力,POD和CAT活性低升高抑的结果与徐秋曼等^[30]的研究结果类似。

4 结论

(1)低浓度的As(<4 mg/kg)对谷子萌发及生长有促进作用,高浓度(≥ 4 mg/kg)的As对谷子萌发及幼苗生长有一定的抑制作用,且低浓度的砷(<4 mg/kg)对地上部的抑制作用大于根部,高浓度的砷(≥ 4 mg/kg)对根的抑制作用更明显,具体的临界浓度值有待进一步降低处理浓度后继续研究。

(2)关于As胁迫下对谷子叶绿素的影响,主要表现为低浓度的As(<4 mg/kg)促进叶绿素的形成,当As浓度 ≥ 4 mg/kg时叶绿素形成受到抑制。

(3)抗氧化酶系统中,谷子幼苗SOD、POD和CAT活性在As浓度 <4 mg/kg下变化趋势基本一致。当As浓度 ≥ 4 mg/kg时,谷子幼苗SOD活性一直增强。研究一方面揭示了As对谷子的影响机制,同时也对谷子抗As污染和安全生产具有重要意义。

(4)低浓度的As(<4 mg/kg)对谷子生长有刺激作用,有利于叶绿素的合成,同时抗氧化酶系统适度激活,有利于幼苗生长。高浓度的As(≥ 4 mg/kg)对谷子生长有抑制作用,首先是过量的As抑制根系生长,导致地上部茎叶生长缓慢,叶片光合作用降低,同时抗氧化酶系统需要消耗大量能量,不利于幼苗的正常生长。但由于植物生长发育是一个多种代谢途径高度协调统一的过程,因此As对谷子幼苗生长的作用机理还有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 宋伟,陈百明,刘琳.中国耕地土壤重金属污染概况[J].水土保持研究,2013,20(2):293-298.
- [2] Rehman Z U, Khan S, Qin K, et al. Quantification of inorganic arsenic exposure and cancer risk via consumption of vegetables in southern selected districts of Pakistan[J]. Science of the Total Environment, 2016, 550: 321-329.
- [3] Shaibur M R, Kawai S. Effect of arsenic on visible symptom and arsenic concentration in hydroponic Japanese mustard spinach[J]. Environmental and Experimental Botany, 2009, 67(1): 65-70.

- [4] Tu C, Ma L Q. Effects of arsenic on concentration and distribution of nutrients in the fronds of the arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. [J]. Environmental Pollution, 2005, 135(2): 333-340.
- [5] 丁枫华, 刘术新, 罗丹, 等. 基于水培毒性测试的砷对 19 种常见蔬菜的毒性[J]. 环境化学, 2010, 29(3): 439-443.
- [6] Khan I, Ahmad A, Iqbal M. Modulation of antioxidant defence system for arsenic detoxification in Indian mustard[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2009, 72(2): 626-634.
- [7] 万梦雪, 王敏, 周馥荔, 等. 砷对绿豆和黑豆种子萌发的影响[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2013, 35(3): 288-293.
- [8] 巩健. 砷胁迫对黄瓜种子萌发与苗期生长的影响[J]. 西北农业学报, 2016, 25(10): 1502-1507.
- [9] 刘全吉, 孙学成, 胡承孝, 等. 砷对小麦生长和光合作用特性的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(2): 854-859.
- [10] Azizur R M, Hasegawa H, Mahfuzur R M, et al. Effect of arsenic on photosynthesis, growth and yield of five widely cultivated rice (*Oryza sativa* L.) varieties in Bangladesh [J]. Chemosphere, 2007, 67(6): 1072-1079.
- [11] 徐玲玲, 李娅迪, 冯旭东, 等. 砷胁迫对紫茉莉生理生化特性的影响[J]. 山地农业生物学报, 2015, 34(4): 13-17.
- [12] 常思敏, 马新明, 蒋媛媛, 等. 土壤砷污染及其对作物的毒害研究进展[J]. 河南农业大学学报, 2005, 39(2): 161-166.
- [13] 刘更另. 矿质微量元素与食物链[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994: 4-6.
- [14] Garg N, Singla P. Arsenic toxicity in crop plants: Physiological effects and tolerance mechanisms[J]. Environmental Chemistry Letters, 2011, 9(3): 303-321.
- [15] 张彦良. 山西省谷子种植区域划分与配套品种概述[J]. 种子科技, 2016, 34(6): 42.
- [16] 朱云集, 王晨阳, 马元喜, 等. 砷胁迫对小麦根系生长及活性氧代谢的影响[J]. 生态学报, 2000, 20(4): 707-710.
- [17] 刘志彦, 陈桂珠, 田耀武. 不同水稻品系幼苗对砷(As)的耐性、吸收及转运[J]. 生态学报, 2008, 28(7): 3228-3235.
- [18] 郝玉波, 刘华琳, 慈晓科, 等. 砷对玉米生长、抗氧化系统及离子分布的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(12): 3183-3190.
- [19] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 1990.
- [20] 杨颖丽, 王文瑞, 尤佳, 等. Cd²⁺ 胁迫对小麦种子萌发、幼苗生长及生理生化特性的影响[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2012, 48(3): 88-94.
- [21] 孙亚莉, 刘红梅, 徐庆国. 镉胁迫对不同水稻品种种子萌发特性的影响[J]. 中国水稻科学, 2017, 31(4): 425-431.
- [22] 李牡丹. 重金属 Pb 对芨芨草种子萌发及其幼苗生长的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
- [23] 肖志华, 张义贤, 张喜文, 等. 外源铅、铜胁迫对不同基因型谷子幼苗生理生态特性的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(3): 889-897.
- [24] 刘拥海, 俞乐, 陈奕斌, 等. 不同荞麦品种对铅胁迫的耐性差异[J]. 生态学杂志, 2006, 25(11): 1344-1347.
- [25] 江行玉, 赵可夫. 植物重金属伤害及其抗性机理[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(1): 92-99.
- [26] Shaibur R K S. Effect of arsenic on visible symptom and arsenic concentration in hydroponic Japanese mustard spinach[J]. Environmental and Experimental Botany, 2009, 67(1): 65-70.
- [27] 袁霞, 李艳梅, 张兴昌. 铜对小青菜生长和叶片保护酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 467-471.
- [28] Petterson O. Differences in cadmium uptake between plant species and cultivars[J]. Swedish Journal of Agricultural Research, 1997, 7: 21-24.
- [29] 赵秀峰, 张强, 程滨, 等. 硒对砷胁迫下小白菜生理特性及砷吸收的影响[J]. 环境科学学报, 2017, 37(9): 3583-3589.
- [30] 徐秋曼, 陈宏, 程景胜, 等. 镉对油菜叶细胞膜的损伤及细胞自身保护机制初探[J]. 农业环境科学学报, 2001, 20(4): 235-237.
- [30] 刘建波, 毛家伟, 张绵中, 等. 周口市烟区不同优化施肥处理对烤烟生长发育及经济性状的影响[J]. 现代农业科技, 2016(1): 28.
- [31] 王丽渊, 刘国顺, 王林虹, 等. 生物质炭对烤烟干物质积累量及根际土壤理化性质的影响[J]. 华北农学报, 2014, 29(1): 140-144.
- [32] 赵殿峰, 徐静, 罗璇, 等. 生物炭对土壤养分、烤烟生长以及烟叶化学成分的影响[J]. 西北农业学报, 2014, 23(3): 85-92.
- [33] 黎妍妍, 许自成, 王金平, 等. 湖南烤烟总糖、还原糖含量与几种土壤养分的关系分析[J]. 土壤通报, 2007, 38(5): 911-914.

(上接第 351 页)

- [26] 陈丹梅, 陈晓明, 梁永江, 等. 种植模式对土壤酶活性和真菌群落的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(2): 77-84.
- [27] Xu G, Lv Y, Sun J, et al. Recent advances in biochar applications in agricultural soils: Benefits and environmental implications[J]. Clean-Soil Air Water, 2012, 40(10): 1093-1098.
- [28] 周玉祥, 宋子岭, 孔涛, 等. 不同秸秆生物炭对露天煤矿排土场土壤微生物数量和酶活性的影响[J]. 环境化学, 2017, 36(1): 106-113.
- [29] 熊佰炼, 谭必勇. 生物质炭还田利用对土壤酶活性影响研究现状[J]. 遵义师范学院学报, 2017, 19(3): 106-110.