

无机三价砷对生菜的生态毒性及其生物积累

赖长鸿, 刘亚玲, 贺鸿志, 黎华寿, 陈桂葵*

(华南农业大学 农业部华南热带农业环境重点实验室, 广州 510642)

摘要:为研究无机三价砷 As(Ⅲ)对生菜的生态毒性及其生物积累,采用生菜种子发芽试验和土培试验相结合的方法,从种子萌发、植株生长、生理特性以及生菜砷含量等方面研究了生菜对无机砷污染响应。种子发芽试验表明,随着 As(Ⅲ)浓度的升高,生菜种子的发芽率、发芽势逐渐减低,当 As(Ⅲ)浓度高于 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,显著抑制生菜种子的萌发,其抑制比例大于 6.67%。土培盆栽试验表明:当土壤中添加的 As(Ⅲ)浓度高于 $50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,生菜的株高和生物量显著低于对照组,当土壤中添加的 As(Ⅲ)浓度升至 $200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,生菜的株高只有对照组的 86.07%,地上部和地下部干重则只有对照组的 72.39%和 72.73%;随着土壤砷浓度的升高,生菜叶片的叶绿素含量、叶绿荧光参数和抗氧化酶活性均呈现出“低浓度促进高浓度抑制”的趋势,高浓度的砷可导致生菜叶片丙二醛含量显著升高;随着土壤砷含量的升高,生菜地上部和地下部的砷含量也明显增加,其范围分别介于 $0.39\sim 2.15\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1.18\sim 2.56\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,当土壤砷含量高于 $14.98\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,生菜可食用部分的砷含量超出了我国《食品卫生标准》中所规定的限值标准 $0.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

关键词:无机三价砷;生菜;生态毒理;生物积累

中图分类号:X503.231 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)05-0831-06 doi:10.11654/jaes.2015.05.003

Eco-toxicity and Accumulation of Inorganic Trivalent Arsenic in Lettuce

LAI Chang-hong, LIU Ya-ling, HE Hong-zhi, LI Hua-shou, CHEN Gui-kui*

(Key Laboratory of Agro-Environment in the Tropics, Ministry of Agriculture, P.R. China, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Seed germination test and pot experiment were conducted to investigate the eco-toxicity and accumulation of inorganic trivalent arsenic in lettuce. The seed germination, plant growth, physiological characteristics and arsenic accumulation in lettuce were examined. The germination rates and germination potential of lettuce seeds decreased as As(Ⅲ) concentrations increased. At As(Ⅲ) concentrations greater than $1.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, the seed germination was inhibited significantly, with over 6.67% reduction. In the pot experiment, plant height and biomass of lettuce were lower than those in the control when As(Ⅲ) was added to soil at more than $50.00\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. When As(Ⅲ) concentration was $200.00\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, the plant height was only 86.07% of the control, and the dry weights of the aboveground and underground parts were only 72.39% and 72.73% of the control, respectively. The chlorophyll content, leaf fluorescence parameters and antioxidant enzyme activities increased at low arsenic concentrations and then decreased at higher concentrations. High levels of soil arsenic could lead to a significant rise of malondialdehyde content in lettuce leaves. Arsenic concentrations in both aboveground and belowground parts of lettuce increased significantly with increasing soil arsenic, which were respectively $0.39\sim 2.15\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $1.18\sim 2.56\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. When arsenic concentrations in soil were higher than $14.98\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, the arsenic concentrations detected in the edible part of lettuce would be beyond the food health standard value of $0.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Keywords: inorganic trivalent arsenic; lettuce; eco-toxicity; accumulation

收稿日期:2014-12-13

基金项目:863 项目(2013AA102402)

作者简介:赖长鸿(1990—),男,硕士研究生,主要从事污染生态学研究。E-mail:fjnlxlch@126.com

* 通信作者:陈桂葵 E-mail:guikuichen@scau.edu.cn

砷(As)是一种类金属元素,通常情况下以极低浓度广泛存在于自然界中,不会对生物造成危害,但目前环境中的砷主要来源于采矿、冶炼、化石燃料、油漆、农药、化肥、饲料添加剂等工农业活动^[1-3]。我国是世界上砷污染最为严重的国家之一,在某些采矿点附近土壤砷含量可高达 $28\,522\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[4],严重影响了当地农作物的生产。环境中较高浓度的砷会影响种子萌发^[5],干扰植物水分代谢^[6],破坏植物光合系统^[7],影响作物生理过程^[8-9],降低农作物的产量和品质,严重时甚至导致植株死亡^[10]。作物中吸收积累的砷可通过食物链进而影响人体各种器官的正常功能,导致神经、免疫、消化和生殖系统紊乱,严重影响人体健康^[11-14]。已有研究发现,砷主要累积在耕作层,易被作物尤其是蔬菜吸收富集,且叶菜类蔬菜中的砷含量一般高于根茎类和瓜果类^[15-16]。

生菜(*Lactuca sativa*)属菊科莴苣属,一年生或二年生草本作物,由于其生长快、产量高、适应性广、口感好,深受人民喜爱,在全国各地被广泛种植,是一种最普遍的食用叶菜类蔬菜。目前关于砷的毒理学研究主要是以动物为材料的居多,而对植物尤其是蔬菜的毒性效应研究不多,关于砷胁迫下的生菜抗氧化酶体系的研究较少^[17],暂未见砷胁迫对生菜叶绿素含量和叶绿素荧光参数的报道。本文主要从生菜的种子萌发、生长、生理以及生菜不同部位砷含量等方面,探讨砷胁迫对生菜的毒性效应以及累积砷的规律,以期对砷污染区的生菜种植业安全生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试生菜为意大利全年耐抽苔生菜,种子购自广州市先科联蔬菜技术中心。供试土壤采自华南农业大学农学院生态系农场菜地 0~20 cm 土层,去杂,自然风干,磨碎后过孔径 2 mm 筛备用。测得土壤基本理化性质见表 1。

表 1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of tested soil

项目	含量	项目	含量
全氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	1.43	碱解氮/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	81.36
全磷/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	2.08	速效磷/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	128.92
全钾/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	25.96	速效钾/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	244.06
有机质/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	24.56	总砷/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	4.98
pH	6.11		

1.2 试验方法

1.2.1 种子萌发试验

将籽粒饱满的生菜种子用 1% 的次氯酸钠溶液浸泡 20 min 消毒,去离子水漂洗干净后,播于已铺有两层湿润滤纸的玻璃培养皿中,将培养皿置于人工气候室内 $[(25\pm 2)^{\circ}\text{C}, 45\%\pm 7\%\text{ RH}]$ 进行发芽试验。挑取一致的种子均匀撒播于培养皿中,每皿 25 粒,加含砷溶液 10 mL,砷浓度[以 As(Ⅲ)计]分别设为 0、0.1、1、5、10、20、50、100、200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,每一浓度 3 个重复,共 27 个处理。种子萌发期间所有试验条件保持一致,每天更换一次滤纸和加入 10 mL 相应浓度的污染物溶液,处理 4 d 后,统计发芽势,7 d 后记录发芽率^[18]。

1.2.2 盆栽试验

以塑料圆桶(高×下部直径×上部直径:23 cm×20 cm×31 cm)作为盆栽容器,每盆装入 5.00 kg 菜地土,将事先预备好的菜地土混匀后装入塑料盆中,准确量取一定量的含砷[以 As(Ⅲ)计]母液,定容后加入到土壤中,使土壤中添加的 As(Ⅲ)浓度分别为 0、5、10、50、100、200 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。加水浸泡土壤,并将土壤充分混匀,平衡 10 d 左右。选取长势一致的两叶一芯的生菜幼苗移至各盆中,每盆移栽 3 株幼苗,每个处理 3 个重复。试验期间保持土壤湿润,50 d 后统一收获,测定各项指标。

本文所用含 As(Ⅲ)母液是由无机砷 As_2O_3 和 NaOH 匹配反应生成 NaAsO_2 溶于水配制而成。

1.3 分析测定方法

株高和根长用直尺分别测量。生菜样品收获后,将植株地上部和地下部分离,用去离子水洗净后,用滤纸吸干,直接用万分之一天平称量鲜重,然后分别置于烘箱中 55°C 烘至恒重,称量干重。

叶绿素含量采用便携式叶绿素仪直接测定,叶绿素荧光参数使用美国产的 OS-30P 调制式叶绿素荧光仪直接测定。测定选在种植后第 45 d(晴天)上午 9:00—10:00 温室大棚中,测量时选取生长一致的生菜叶片,用叶片夹夹住生菜叶片 20 min,然后测定基础荧光(F_0)、最大荧光(F_m)、PS II 的潜在活性(F_v/F_0)和 PS II 的光化学效率(F_v/F_m)。

取生菜的倒数第二片叶子进行植物抗氧化酶活性等的测定。参照陈建勋等^[19]的方法,用氮蓝四唑(NBT)还原法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性,于 560 nm 波长以抑制 NBT 光化还原 50% 为 1 个酶活性单位 U,酶活性以 $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\text{ FW}$ 表示;用过氧化氢法测定过氧化氢酶(CAT)活性,于 240 nm 波长处以每分

钟吸光度减少 0.01 为 1 个活力单位 U,酶活性以 $\text{U} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$ 表示;采用愈创木酚法测定过氧化物酶活性,以 470 nm 波长每分钟吸光度增加 0.01 为 1 个活力单位,酶活性以 $\text{U} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$ 表示;丙二醛含量(MDA)采用硫代巴比妥酸法测定。

将烘干后的植物样品用微型植物粉碎机粉碎,过 75 目筛,称取 0.3 g(精确至 0.001 g)放入消解罐中,加入 6 mL 浓硝酸以及 2 mL 30%的双氧水,浸泡 1 h 后进行微波消解,用去离子水将消解液定容到 25 mL,冷藏待测。

总砷的测定:吸取 4 mL 消解液,加入 1 mL 硫脲,混合均匀后用 AFS-930 型双道原子荧光光度计测定。

1.4 数据处理和统计分析

试验数据用平均数±标准误(Mean±SE)来表示,采用 Microsoft Excel 和 SPSS 13.0 进行统计,并用 Duncan 检验法进行差异显著性分析($P<0.05$)。

参考李玲的《植物生理学模块实验指导》^[18],采用以下公式计算生菜种子的发芽率和发芽势:

发芽率(%)=(发芽种子数/供试种子数)×100%

发芽势(%)=(4 d 内种子的发芽数/供试种子数)×100%

相对生长量(%)=(处理组/对照组)×100%

2 结果与分析

2.1 砷对生菜种子萌发的影响

发芽率和发芽势是反映种子萌发的重要参数,不同浓度 As(Ⅲ)处理对生菜种子萌发的影响见表 2。当 As(Ⅲ)浓度为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,生菜种子的发芽率与对照组无显著差异,但随 As(Ⅲ)浓度的升高,种子发芽率显著下降;当 As(Ⅲ)浓度升至 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,生菜种子的发芽率分别只有对照组的 20.00%和 4.00%。As(Ⅲ)对生菜种子发芽势的影响呈

表 2 As(Ⅲ)对生菜种子萌发的影响
Table 2 Effect of As(Ⅲ) on seed germination of lettuce

As(Ⅲ)浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	发芽率/%	发芽势/%	相对量/%	
			发芽率	发芽势
0	100.00±0.00a	86.67±1.33b	100.00	100.00
0.1	100.00±0.00a	93.33±1.33a	100.00	107.68
1	93.33±1.33b	84.00±2.31b	93.33	96.92
5	88.00±2.31b	81.33±1.33b	88.00	93.84
10	65.33±2.67c	58.67±3.53c	65.33	67.69
20	37.33±2.67d	30.67±1.33d	37.33	35.39
50	20.00±2.31e	17.33±1.33e	20.00	20.00
100	4.00±2.31f	4.00±2.31f	4.00	4.62

注:同列数据后的不同字母表示不同砷浓度处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

现出低浓度促进而高浓度抑制的规律,当 As(Ⅲ)浓度为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,生菜种子的发芽势显著高于对照组,是对照组的 107.68%;当 As(Ⅲ)浓度为 $1、5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,发芽势与对照比无显著差异,而当 As(Ⅲ)浓度高于 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,发芽势显著下降。

2.2 砷对生菜植株生长的影响

株高、根长和生物量是反映生物生长情况的三个指标。由表 3 可见,As(Ⅲ)对生菜株高、根长和生物量的影响均表现出低浓度促进高浓度抑制的效果,且浓度越高抑制作用越明显,当土壤中添加的 As(Ⅲ)升至 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,生菜的株高和根长分别只有对照组的 86.07%和 74.48%,生菜地上部和地下部干重则只有对照组的 72.39%和 72.73%。

2.3 砷对生菜光合特性的影响

叶绿素含量是反映光合作用能力的重要指标之一,常作为植物抗性指标应用于评价污染物对植物生长的影响。由表 4 可见,随着砷浓度的升高,生菜光合特性呈现低促高抑的趋势。当土壤中添加的 As(Ⅲ)浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,生菜的叶绿素荧光参数和叶绿素含量显著高于对照组;当土壤中添加的 As(Ⅲ)浓

表 3 砷对生菜生长的影响
Table 3 Effect of arsenic on lettuce growth

土壤中添加的 As(Ⅲ)/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	株高/cm	根长/cm	鲜重/ $\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$		干重/ $\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$	
			地上部	地下部	地上部	地下部
0	19.02±0.10b	3.88±0.03b	33.47±0.87bc	2.32±0.07bc	1.34±0.05bc	0.22±0.01c
5	19.67±0.09b	3.97±0.14b	37.43±0.66b	2.57±0.03ab	1.45±0.11b	0.27±0.02b
10	20.73±0.20a	5.09±0.43a	44.23±2.94a	3.00±0.31a	1.95±0.10a	0.37±0.02a
50	17.93±0.33c	3.65±0.13b	31.76±0.10c	2.19±0.01bc	1.20±0.30cd	0.22±0.01c
100	17.26±0.34c	3.29±0.05bc	30.55±0.18cd	2.04±0.07cd	1.11±0.06d	0.20±0.01cd
200	16.37±0.30d	2.89±0.21c	25.81±2.57d	1.72±0.14d	0.97±0.05d	0.16±0.02d

度为 50、100 mg·kg⁻¹ 时,生菜叶绿素荧光参数与对照组无显著性差异,但当土壤中添加的 As(Ⅲ)浓度为 200 mg·kg⁻¹ 时,则显著低于对照组。总体上,当土壤中添加的 As(Ⅲ)浓度高于 50 mg·kg⁻¹ 时,生菜叶绿素含量均显著低于对照组。

表 4 砷对生菜光合特性的影响

Table 4 Effect of arsenic on photosynthetic characteristics of lettuce

土壤中添加的 As(Ⅲ)/mg·kg ⁻¹	叶绿素荧光参数		叶绿素含量 (SPAD 值)
	Fv/F _m	Fv/F ₀	
0	0.848±0.003bc	5.583±0.145bc	23.83±0.06b
5	0.859±0.002b	6.111±0.111b	24.29±0.08b
10	0.873±0.008a	6.962±0.499a	25.84±0.26a
50	0.840±0.001c	5.244±0.026c	23.28±0.01c
100	0.837±0.002c	5.136±0.086c	22.19±0.06d
200	0.811±0.001d	4.296±0.034d	20.60±0.32e

2.4 砷对生菜抗氧化酶活性的影响

抗氧化保护酶系统是植物体内控制活性氧平衡的重要物质,是反应植物适应逆境的重要指标。由表 5 可见,三种抗氧化酶活性随土壤中添加的 As(Ⅲ)浓度的升高均呈现低浓度促进而高浓度抑制的趋势。当土壤中添加的 As(Ⅲ)浓度为 5、10 mg·kg⁻¹ 时,生菜叶片的 SOD、CAT 和 POD 活性均显著高于对照组;当土壤中添加的 As(Ⅲ)浓度为 50、100、200 mg·kg⁻¹ 时,生菜的 SOD 和 POD 活性显著下降,而 CAT 也在添加的 As(Ⅲ)浓度高于 100 mg·kg⁻¹ 时显著低于对照组。这说明当土壤中添加的 As(Ⅲ)浓度高于 100 mg·kg⁻¹ 时,生菜的抗氧化保护酶系统活性降低,可能机体处于受损害状态。

2.5 砷对生菜丙二醛(MDA)含量的影响

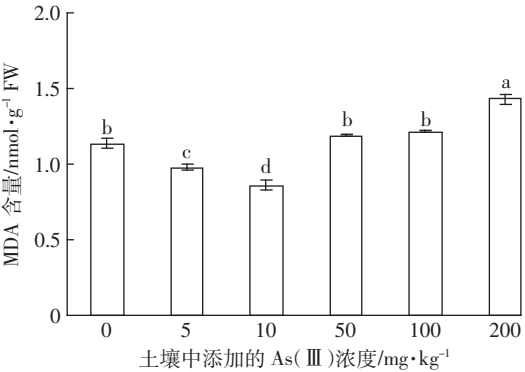
MDA 是膜脂氧化的主要产物,可反映植物体

表 5 砷对抗氧化酶活性影响

Table 5 Effects of arsenic on activities of antioxidant enzymes in lettuce

土壤中添加的 As(Ⅲ)/mg·kg ⁻¹	SOD/ U·g ⁻¹ FW	CAT/ U·min ⁻¹ ·g ⁻¹ FW	POD/ U·min ⁻¹ ·g ⁻¹ FW
0	234.490±3.505b	7.567±0.102c	154.812±4.568b
5	242.686±2.050ab	10.404±1.321b	196.246±14.094a
10	250.431±1.852a	17.631±0.439a	218.053±9.438a
50	219.152±3.408c	6.552±0.607cd	127.047±2.272c
100	207.096±2.058c	4.823±0.151de	109.992±6.125cd
200	174.478±8.604d	3.565±0.124e	87.172±2.934d

内过氧化作用的强弱。由图 1 可见,随 As(Ⅲ)浓度的升高,MDA 含量呈现先降低后升高的趋势。当土壤中添加的 As(Ⅲ)浓度为 5、10 mg·kg⁻¹ 时,生菜体内的 MDA 含量均显著低于对照组;当土壤中添加的 As(Ⅲ)浓度为 50、100 mg·kg⁻¹ 时,MDA 含量与对照比差异不显著,而当土壤中添加的 As(Ⅲ)浓度为 200 mg·kg⁻¹ 时,MDA 显著升高,说明生菜体内已经积累了过量的脂质过氧化产物。



不同字母表示不同砷浓度处理间的差异显著(P<0.05)。下同

图 1 砷对生菜叶片丙二醛含量的影响

Figure 1 Effect of arsenic on MDA contents of lettuce

2.6 生菜各部位对砷的富集

由图 2 可见,随着 As(Ⅲ)浓度的升高,生菜地上部和地下部的砷含量都明显增加,且在同一处理浓度下,生菜地下部的砷含量显著高于其地上部。当土壤中添加的 As(Ⅲ)浓度低于 50 mg·kg⁻¹ 时,生菜地上部砷含量与对照组无显著性差异,而当土壤中添加的 As(Ⅲ)浓度达到 50 mg·kg⁻¹ 时,生菜地上部砷含量显著高于其对照组以及其他低剂量添加组。

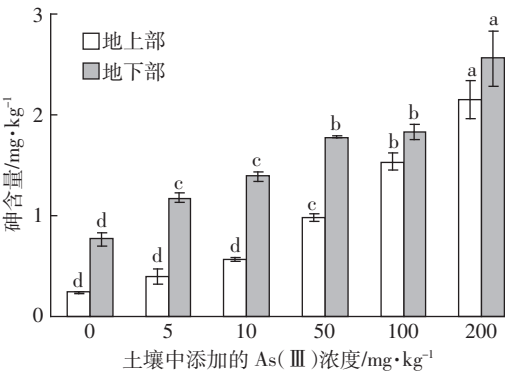


图 2 土壤中添加砷对生菜各部位砷含量的影响

Figure 2 Concentrations of arsenic in lettuce under different treatments

3 讨论

试验结果表明,砷胁迫可抑制生菜的种子萌发和植株生长,使抗氧化酶活性下降,生物量下降,与前人^[10,20-21]对其他植物的研究结果一致;同时,研究还表明,长时间的砷胁迫会降低生菜的叶绿素荧光参数和叶绿素含量,说明高浓度的砷胁迫可破坏生菜的光合系统,影响其正常光合生理过程,也与李仁英等^[5]的试验结果一致。目前的研究表明,植物在砷胁迫下会通过各种途径产生大量的活性氧(Reactive oxygen species, ROS),造成活性氧积累而引起严重的危害。薛美昭等^[22]的研究证实 NaAsO_2 能诱发蚕豆保卫细胞程序性死亡,该过程是由胁迫引发的 ROS 升高引起的,ROS 可能通过激活质膜 Ca^{2+} 通道,使胞外 Ca^{2+} 内流,造成胞内 Ca^{2+} 浓度升高,进而诱导细胞程序性死亡,当过氧化氢酶与 NaAsO_2 共同作用时,细胞死亡率显著低于砷单独处理组。当植物受到砷胁迫时,其体内的抗氧化防御酶系被激活,抗氧化酶如 SOD、CAT、POD 等的活性提高,以维持细胞内的氧化还原平衡,同时植物体内解毒系统中的植物络合素、金属硫蛋白和谷胱甘肽硫转移酶以及蛋白和非蛋白巯基等均能与砷结合,发挥解毒作用^[9,23]。但由于植物难以适应较高浓度的砷胁迫,会产生毒性效应,如破坏植物的光合系统,降低植物生物量,甚至导致植物死亡等^[7-10]。因此,氧化胁迫是目前比较公认砷毒性作用机制,即砷可诱发植物体内 ROS 的生成,而 ROS 分子能破坏细胞膜及胞内生物大分子如膜脂、蛋白和核苷酸^[24],进而影响细胞和分子的结构与功能,使细胞生理功能紊乱,细胞死亡。本试验也表明当土壤砷浓度较高(高于 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 时,生菜体内脂质过氧化产物 MDA 显著升高,生菜的抗氧化保护酶 SOD、POD 和 CAT 的活性显著下降,说明高浓度的砷胁迫降低了生菜的活性氧清除能力,导致了生菜的毒性效应。

环境中过量的砷不仅严重影响作物的生长和生理,降低产量和品质,还会直接或通过食物链进入人体,产生生物放大效应,危害人体健康^[12-14]。作物种类不同,吸收富集砷的能力也不同。肖细元等^[16]的研究发现,水稻的砷含量显著高于小麦和玉米,不同种类蔬菜砷含量大小依次为叶菜类>根茎类>茄果类>鲜豆类。本试验中的生菜属于叶菜类蔬菜,当土壤砷含量高于 $14.98 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,其地上部砷含量超出了我国《食品卫生标准》中所规定的蔬菜可食用部分砷含量最大值 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,存在严重的食品安全风险。有

研究认为少施磷肥是减少土壤砷向植物转移的有效措施之一^[25]。这主要是因为砷与磷的化学性质类似,在土壤-植物系统中的行为也很相像,磷能够通过离子交换作用置换出土壤中的砷,所以施磷肥可增加土壤砷的生物有效性,进而增加作物吸收砷的风险^[25-26]。同时,正是由于砷与磷的结构类似,砷可通过质膜上的磷转运通道而进入植物细胞内,干扰磷的代谢过程,砷可代替磷与胞内酶和组织蛋白中的巯基发生反应,导致蛋白结构异常、多种酶促反应受阻等^[23]。因此,根据砷的这种生物学特性,可以采取适当的农艺措施来降低土壤中砷的生物有效性,减少植物对砷的吸收,降低砷对植物的危害,这对当前耕地日益减少而污染土壤中的砷仍未达到安全标准之前,保证粮食数量和质量安全有非常重要的意义。

4 结论

当 $\text{As}(\text{III})$ 浓度高于 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,可显著抑制生菜种子的萌发,且浓度越高抑制效果越明显;当土壤中添加的 $\text{As}(\text{III})$ 浓度高于 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,可显著抑制生菜地上部的生长,生菜的株高和生物量明显低于对照。随着土壤中添加的 $\text{As}(\text{III})$ 浓度的升高,生菜的光合参数和抗氧化酶活性均表现出“低浓度促进高浓度抑制”的趋势,且浓度越高抑制作用越明显,高浓度的砷可导致丙二醛含量显著升高。随着土壤砷含量的升高,生菜地上部和地下部的砷含量都明显增加,当土壤砷含量高于 $14.98 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,生菜可食用部分的砷含量超出了我国《食品卫生标准》中所规定的限值标准,存在明显的食品安全风险。

参考文献:

- [1] Garelick H, Jones H, Dybowska A, et al. Arsenic pollution sources[J]. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 2008, 197: 17-60.
- [2] Tarvainen T, Albanese S, Birke M, et al. Arsenic in agricultural and grazing land soils of Europe[J]. *Applied Geochemistry*, 2013, 28(1): 2-10.
- [3] 姚丽贤,黄连喜,蒋宗勇,等. 动物饲料中砷、铜和锌调查及分析[J]. *环境科学*, 2013, 34(2): 732-739.
YAO Li-xian, HUANG Lian-xi, JIANG Zong-yong, et al. Investigation and analysis arsenic, copper and zinc of in animal feed[J]. *Environmental Sciences*, 2013, 34(2): 732-739.
- [4] Liao X Y, Chen T B, Lei M, et al. Root distributions and elemental accumulations of Chinese brake(*Pteris vittata* L.) from As contaminated soils[J]. *Plant and Soil*, 2004, 261(1-2): 109-116.
- [5] 李仁英,沈孝辉,张耀鸿,等. 无机砷对不同水稻品种种子萌发和幼

- 苗光合生理的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(6): 1067-1074.
- LI Ren-ying, SHEN Xiao-hui, ZHANG Yao-hong, et al. The effects of inorganic arsenic to seed germination seedling photosynthetic physiological in different rice varieties[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(6): 1067-1074.
- [6] Singh N, Ma L Q, Srivastava M, et al. Metabolic adaptations to arsenic-induced oxidative stress in *Pteris vittata* L. and *Pteris ensiformis* L.[J]. *Plant Science*, 2006, 170(2): 274-282.
- [7] Li W X, Chen T B, Huang Z C, et al. Effect of arsenic on chloroplast ultrastructure and calcium distribution in arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L.[J]. *Chemosphere*, 2006, 62(5): 803-809.
- [8] Stoeva N, Berova M, Zlatev Z. Effect of arsenic on some physiological parameters in bean plants[J]. *Biologia Plantarum*, 2005, 49(2): 293-296.
- [9] Sharma I. Arsenic induced oxidative stress in plants[J]. *Biologia*, 2012, 67(3): 447-453.
- [10] Titah H S, Abdullah S R S, Idris M, et al. Arsenic range finding phytotoxicity test against *Ludwigia octovalvis* as first step in phytoremediation[J]. *Research Journal of Environmental Toxicology*, 2012, 6(4): 151-159.
- [11] Han Y H, Moon H J, You B R, et al. Effects of arsenic trioxide on cell death, reactive oxygen species and glutathione levels in different cell types[J]. *International Journal of Molecular Medicine*, 2010, 25(1): 121-128.
- [12] Hughes M F, Beck B D, Chen Y, et al. Arsenic exposure and toxicology: A historical perspective[J]. *Toxicology Science*, 2011, 123(2): 305-320.
- [13] Kim K W, Bang S, Zhu Y G, et al. Arsenic geochemistry, transport mechanism in the soil-plant system, human and animal health issues [J]. *Environment International*, 2009, 35(3): 453-454.
- [14] 韩俊洋, 吴顺华. 地方性砷中毒致肝损伤机制研究进展[J]. 中国公共卫生, 2014, 30(3): 374-376.
- HAN Jun-yang, WU Shun-hua. The review of endemic arsenic poisoning causing liver damage mechanism[J]. *China Public Health*, 2014, 30(3): 374-376.
- [15] 宋波, 伏凤艳, 张学洪, 等. 桂林市菜地土壤和蔬菜砷含量调查与健康风险评估[J]. 环境科学学报, 2014, 34(3): 728-735.
- SONG Bo, FU Feng-yan, ZHANG Xue-hong, et al. A survey of arsenic concentrations in vegetables and soils in Guilin and the health risks assessment[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(3): 728-735.
- [16] 肖细元, 陈同斌, 廖晓勇, 等. 我国主要蔬菜和粮油作物的砷含量与砷富集能力比较[J]. 环境科学学报, 2009, 29(2): 291-296.
- XIAO Xi-yuan, CHEN Tong-bin, LIAO Xiao-yong, et al. Comparison of concentrations and bioconcentration factors of arsenic in vegetables grain and oil crops in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(2): 291-296.
- [17] Cusman G S, Oliveira J A, Farnese F S. Mineral nutrition and enzymatic adaptation induced by arsenate and arsenite exposure in lettuce plants[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2013, 10(71): 307-314.
- [18] 李玲. 植物生理学模块实验指导[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 25-27.
- LI Ling. Plant physiology experiment module guide[M]. Beijing: Science Press, 2009: 25-27.
- [19] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2006: 68-81.
- CHEN Jian-xun, WANG Xiao-feng. Plant physiology experiment guidance[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2006: 68-81.
- [20] 谢飞, 王宏斌, 王海娟, 等. 砷胁迫对不同砷富集能力植物叶片抗氧化酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(7): 1379-1385.
- XIE Fei, WANG Hong-bin, WANG Hai-juan, et al. The effect of antioxidant enzyme activity under the As stress on plant leaves of different arsenic enrichment ability[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(7): 1379-1385.
- [21] 胡拥军, 王海娟, 王宏斌, 等. 砷胁迫下不同砷富集能力植物内源生长素与抗氧化酶的关系[J]. 生态学报, 2015, 35(10). DOI: 10.5846/stxb201312022863.
- HU Yong-jun, WANG Hai-juan, WANG Hong-bin, et al. The relationship between endogenous auxin and antioxidant enzymes in two plants with different arsenic-accumulative ability under arsenic stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(10). DOI: 10.5846/stxb201312022863.
- [22] 薛美昭, 仪慧兰. 砷诱导蚕豆气孔保卫细胞死亡的毒性效应[J]. 生态学报, 2014, 34(5): 1134-1139.
- XUE Mei-zhao, YI Hui-lan. The effect of stomatal guard cells death for arsenic inducing horsebean toxicity[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(5): 1134-1139.
- [23] Malik J A, Goel S, Kaur N, et al. Selenium antagonises the toxic effects of arsenic on mungbean (*Phaseolus aureus* Roxb.) plants by restricting its uptake and enhancing the antioxidative and detoxification mechanisms[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2012, 77: 242-248.
- [24] Wu L H, Yi H L, Yi M. Assessment of arsenic toxicity using *Allium/Vicia* root tip micronucleus assays[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 176(1-3): 952-956.
- [25] 杨玲, 连娟, 郭再华, 等. 砷胁迫下磷用量对不同磷效率水稻产量、生物量以及P、As含量的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(8): 1627-1635.
- YANG Ling, LIAN Juan, GUO Zai-hua, et al. The influence of dosage of different phosphorus efficiency to rice production, biomass and the content of P, under arsenic stress[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(8): 1627-1635.
- [26] Cui Y S, Du X, Weng L P, et al. Assessment of in situ immobilization of lead (Pb) and arsenic (As) in contaminated soils with phosphate and iron: Solubility and bioaccessibility[J]. *Water Air Soil Pollution*, 2010, 213(1-4): 95-104.