

张 骞, 曾希柏, 苏世鸣, 等. 不同品种苋菜对砷的吸收能力及植株磷砷关系研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(10): 1888-1894.

ZHANG Qian, ZENG Xi-bai, SU Shi-ming, et al. Arsenic uptake by different species of amaranth and the relationship between arsenic and phosphate in amaranth[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(10): 1888-1894.

## 不同品种苋菜对砷的吸收能力及植株磷砷关系研究

张 骞, 曾希柏\*, 苏世鸣, 王亚男, 白玲玉, 吴翠霞, 高 雪, 贾武霞

(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所/农业部农业环境重点实验室, 北京 100081)

**摘 要:**利用水培试验方法,研究了不同品种苋菜对 As(V)的耐性、富集能力及其植株中 P、As 含量间的关系。结果表明,当营养液中 As(V)浓度为  $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,As(V)促进了花红柳叶、红柳叶苋菜的生长,但对其他品种苋菜的生长有抑制作用;当营养液中 As(V)浓度达到  $4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,As(V)对所有品种苋菜的生长都有明显的抑制作用。两种 As(V)浓度处理下,苋菜不同品种地上部砷含量均为白圆叶苋菜 $\approx$ 红柳叶苋菜 $>$ 花红柳叶苋菜 $>$ 花红苋菜 $>$ 严选红圆叶苋菜。当营养液中 As(V)浓度为  $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,苋菜地上部 P 含量与 As 含量有显著相关性( $r=0.881$ ),当营养液中 As(V)浓度为  $4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时地上部 P、As 含量间的相关性不显著,但相关系数达到 0.816。苋菜种子中 P 含量与两种 As(V)浓度处理下地上部 As 含量呈显著或极显著相关性( $r=0.937, 0.971$ )。

**关键词:** 苋菜; 砷; 低吸收; 磷; 品种

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2016)10-1888-07 doi:10.11654/jaes.2016-0687

### Arsenic uptake by different species of amaranth and the relationship between arsenic and phosphate in amaranth

ZHANG Qian, ZENG Xi-bai\*, SU Shi-ming, WANG Ya-nan, BAI Ling-yu, WU Cui-xia, GAO Xue, JIA Wu-xia

(Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Agro-Environment, Ministry of Agriculture of China, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In this study, a hydroponic experiment was conducted to investigate the resistance and accumulation of arsenic (As) in five amaranth species at two exposure concentrations of As ( $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) as well as correlation relationship between arsenic and phosphorus contents in amaranth. At the As concentration of  $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , the growths of Huahongliuye and Hongliuye amaranth were improved, but the other three species were inhibited compared with the control without As addition. Differently, the growths of all the five species were significantly inhibited when the concentration of As increased to  $4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . For the two investigated As treatments, As accumulation in the shoot of the five amaranth species ranked in the same order as follows: Baiyuanye  $\approx$  Hongliuye  $>$  Huahongliuye  $>$  Huahong  $>$  Yanxuanhongyuanye. Furthermore, the content of phosphorus in amaranth shoot significantly correlated with that of As ( $r=0.881$ ) at the As concentration of  $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , but insignificant correlation occurred at the As concentration of  $4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  ( $r=0.816$ ). Additionally, significant correlation between phosphorus content in amaranth seed and that of As in amaranth shoot was also observed for the two investigated As treatments at  $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  ( $r=0.937$ ) and  $4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  ( $r=0.971$ ).

**Keywords:** amaranth; arsenic; low-accumulation; phosphorus; species

砷是一种剧毒物质,被世界卫生组织列为一级致癌物,土壤中的砷被作物吸收后可经食物链进入人体

危害人体健康<sup>[1]</sup>。《全国土壤污染状况调查公报》数据显示我国砷污染农田中 90% 以上农田属于中轻度污染<sup>[2]</sup>,针对我国土壤砷污染状况一些学者提出可在中轻度砷污染农田上种植砷低吸收植物,在保证食品安全的基础上充分利用农田资源<sup>[3]</sup>。大量试验证明不同植物种类或品种对砷的富集能力存在显著差异,在众多植物种类或品种中筛选砷低吸收植物种类或品种

收稿日期: 2016-05-18

基金项目: 国家自然科学基金项目“中轻度污染农田中砷的稳定化及根土界面行为研究”(41541007)

作者简介: 张 骞(1990—),男,山东泰安人,硕士研究生,主要从事污染农田修复研究。E-mail: zhangqianxs@foxmail.com

\* 通信作者: 曾希柏 E-mail: zengxibai@caas.cn

是可行的<sup>[4]</sup>,温带粳稻(亚种)、BRRI hybrid dhan 1 等被证实是砷低吸收水稻品种<sup>[5-6]</sup>,茄果类、根茎类蔬菜如番茄、萝卜等对砷的富集能力较弱<sup>[7]</sup>,而叶菜类如空心菜、芹菜等<sup>[7]</sup>对砷的富集能力较强。

砷低吸收植物的筛选可以利用土培、水培试验及调查取样等方法进行,通过比较与分析不同植物体内砷的含量进而确定砷低吸收植物的种类或品种<sup>[8-10]</sup>,也可以通过与砷吸收能力相关的指标判断其对砷吸收能力的大小,比如根系铁膜、根系渗氧能力等<sup>[11-12]</sup>。磷、砷同属于第五主族元素,有很多相似的理化性质,As(V)主要通过磷酸盐转运蛋白进入植物体内,目前磷砷关系方面的研究主要集中在外源磷或植物体内磷含量对植物吸收或抵抗砷毒性的影响,以及磷砷吸收、代谢的机理等方面<sup>[13-14]</sup>,而在植物不同部位磷、砷含量之间关系的研究方面尚不多见。基于植物吸收磷与砷生物化学方面的相似性,是否可通过植物体内磷含量水平来预测其对砷的吸收能力大小,进而筛选砷低吸收植物品种?在本课题组之前的研究基础上,本文以适应水培环境能力较强的苋菜为研究对象,选择具有代表性的5种苋菜,通过水培方法研究了苋菜对As(V)耐性、吸收能力的大小及苋菜体内磷、砷含量之间的关系,相关结果可为砷污染地区苋菜种植提供可靠的品种选择,同时为砷低吸收品种快速筛选的方法研究提供新思路。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试品种为5个苋菜品种,均购自中国农业科学院蔬菜花卉研究所,分别为花红苋菜、严选红圆叶苋菜、花红柳叶苋菜、白圆叶苋菜、红柳叶苋菜(依次记为品种I、品种II、品种III、品种IV、品种V)。试验所用营养液根据华南农业大学叶菜类专用营养液A配方配制<sup>[15]</sup>,所用砷为 $\text{Na}_3\text{AsO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 分析纯。

根据课题组前期的研究结果<sup>[9]</sup>,本次试验营养液砷浓度设置为 $0, 2, 4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,采用稀释浓缩液( $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )的方法配制。

### 1.2 试验方法

挑选粒大饱满不同品种苋菜种子各200粒,置于培养皿中加入20 mL 10% $\text{H}_2\text{O}_2$ 杀菌10 min,然后用去离子水清洗干净,均匀撒播于纯蛭石育苗盘上,将育苗盘置于恒温恒湿培养箱内育苗,设定条件为:28/25℃(昼/夜)、光照 $14 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ 、相对湿度65%,每天分早晚两次补充适量蒸馏水使蛭石保持湿润,供种子萌发和

幼苗正常生长。一周后(长出2片子叶)间苗(株距3 cm,行距5 cm),间苗后用1/2浓度华南农业大学叶菜类专用营养液(以下简称营养液)代替蒸馏水浇灌幼苗,待幼苗长至4片真叶后移栽定植。幼苗定植于含2 L全浓度营养液的水培箱内,每个水培箱定植4株幼苗,在水环境中适应生长1周后进行加砷处理,共设置 $0, 2, 4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 3个砷浓度处理。为减小试验误差,不同苋菜品种相同处理的营养液统一配置,每个处理重复3次,每隔7 d更换一次营养液,定植后25 d收获,将收获后植株地上部和地下部分开,用自来水冲洗干净后放入信封于 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 下杀青30 min, $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至恒重,并分别称量干重。

### 1.3 植株样品的测定

砷的测定采用国标法(GB 5009.11—2014)稍加改进:称量磨碎后的植物干样 $0.5000 \text{ g}$ 放入干净的消煮管内,先加1 mL去离子水使植物样湿润,再依次加入 $8, 2, 1 \text{ mL}$ ,在消煮管上加盖弯颈小漏斗,放置过夜。消煮时温度首先设定为 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 消解至植物固体样变白,管内棕色气体完全被赶出,然后取下小漏斗并用去离子水冲洗小漏斗外壁粘附的液体于消煮管内,再将温度升高到 $180 \text{ }^\circ\text{C}$ 至消煮管内的酸剩余 $1\sim 2 \text{ mL}$ 时停止加热。每批消煮样中加2个标准芹菜样和2个标准圆白菜样进行质量控制。消煮管冷却后用去离子水定容至 $25 \text{ mL}$ ,过滤待测。砷的测定使用氢化物发生原子荧光仪(AFS-920,北京吉天)。

磷的测定采用钼锑抗比色法<sup>[16]</sup>。

### 1.4 数据统计

用Excel 2013、SPSS 19.0进行数据统计分析。

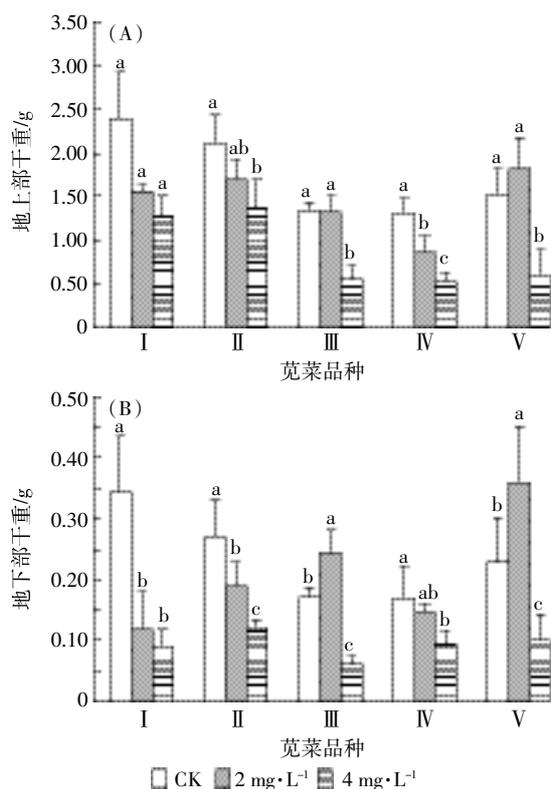
## 2 结果与分析

### 2.1 砷对不同品种苋菜生长的影响

对各处理苋菜生物量进行双因素方差分析,结果显示砷浓度对苋菜地上部生物量的影响大于品种对生物量的影响。从图1(A)可以看出,当砷浓度为 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,品种V地上部生物量较对照有显著增加,品种III地上部生物量与对照相比没有明显变化,品种I、II和IV地上部生物量较对照显著减少,分别减少了约34.6%、20.5%和34.2%。当浓度为 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,品种III和V对砷的耐性大于品种I、II和IV,砷的存在甚至促进了品种V地上部的生长。当As(V)浓度为 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,五个品种地上部生物量较对照和砷浓度为 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时均显著降低。砷浓度为 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时均抑制了不同苋菜品种的生长,与对照相比品种I、II、

Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ地上部干重分别减少了46.4%、35.6%、58.1%、60.5%和60.6%，比较来看，当砷浓度为 $4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时品种Ⅰ和Ⅱ表现出较强的耐性。综上可知，不同 $\text{As}(\text{V})$ 浓度下不同苋菜品种对砷的耐性存在差异。

从图1(B)可以看出，苋菜根系在砷胁迫下的生长情况与地上部相似。砷浓度为 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时品种Ⅲ、Ⅴ地下部干重较对照有显著增加，品种Ⅰ、Ⅱ、Ⅳ地下部干重较对照显著减少，在此浓度下砷对品种Ⅲ、Ⅴ根系的生长起促进作用；当砷浓度升高至 $4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，五个品种根系的生长均受到抑制作用，生物量显著降低，品种Ⅰ地下部干重减少的最多，其次是品种Ⅲ。对比图1(A)和图1(B)可以看出，根系与地上部生物量变化规律较为一致。从表1可以看出，随着营养液中砷浓度的增加，品种Ⅰ、Ⅱ的根冠比(根冠比指植物地下部分与地上部分干重的比值)逐渐减小，说明在砷对地上部和根系生长都表现抑制作用的情况下，砷对根系生长的抑制作用更强；品种Ⅲ、Ⅴ的根冠比随营养液中砷浓度的增加先增大后减小，与



不同字母表示相同品种不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同  
Different letters indicate significant difference across the same cultivar in the different treatment( $P<0.05$ ). The same below

图1 培养液不同浓度砷对五种苋菜地上部(A)和地下部(B)干重的影响

Figure 1 The dry weight of aerial part(A) and root(B) of five amaranth species exposed to different concentration of As

品种Ⅲ、Ⅴ在砷浓度为 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时生长受到促进的变化规律一致；品种Ⅳ的根冠比随砷浓度的增加而增大，说明砷对其根系的影响(抑制作用)小于地上部，与品种Ⅰ、Ⅱ结果不同，可能与品种Ⅳ较高的砷转移系数有关。

表1 五种苋菜不同砷浓度处理下的根冠比

Table 1 The root-shoot ratio of five amaranth species after exposed to different concentration of As

砷浓度 Arsenic concentration	苋菜品种				
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
0	0.144a	0.129a	0.129b	0.130b	0.150b
$2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.075b	0.112ab	0.183a	0.171ab	0.197a
$4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.070b	0.080b	0.107b	0.184a	0.168ab

注:数值为平均值( $n=3$ ),数值后的字母不同表示不同砷浓度处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Note: Data are average values of replicates in each treatment, different letters indicate significant difference within the same column( $P<0.05$ ). The same below.

## 2.2 不同品种苋菜对砷吸收量的变化

从表2可以看出随营养液中砷浓度的提高,各品种苋菜地上部砷含量显著提高。当砷浓度为 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,品种Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ地上部砷含量分别为2.507、1.394、2.916、3.173、3.176  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,若以本次试验苋菜的平均含水率90%计算鲜重砷含量,5种苋菜鲜重砷含量均小于国家农产品安全质量要求(GB18406.1—2001)的规定值( $0.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。当营养液中砷浓度为 $4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,5个品种地上部砷含量相对砷浓度为 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时均有不同程度的增加,其中品种Ⅴ的增幅最大,品种Ⅱ增幅最小,5种苋菜地上部砷含量的大小顺序为品种Ⅴ>品种Ⅳ>品种Ⅲ>品种Ⅰ>品种Ⅱ,换算为鲜重砷含量仅品种Ⅱ地上部砷含量未超过国家食品安全标准。两种砷浓度处理下品种Ⅱ地上部砷含量均显著低于其他四个品种,属于低吸收品种。从表2还可以看出,苋菜地下部砷含量在1.39~673.07  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,远大于地上部的砷含量,进入苋菜根系的砷并没有像N、P、K等大量元素一样主要输送到地上部,而是有相当部分被截留在根系中,既可降低砷对作物地上部的毒害作用,并可增强其抗砷能力。这被认为是植物抵御砷毒害的一种有效方式。

## 2.3 五种苋菜砷转移系数、富集系数的比较

根据表2数据进一步求出不同砷浓度处理苋菜的转移系数和富集系数(图2),转移系数=地上部砷含量/地下部砷含量,富集系数=地上部砷含量/营养液中砷含量。

5种苋菜的转移系数随营养液中砷浓度的增加而增加,随着营养液中砷浓度的提高苋菜根系吸收了更多的砷,转移到地上部的砷也相对增加,当地上部砷含量超过苋菜所能承受的最大砷含量时就会对苋菜的生长造成伤害,往往表现出植株矮小、生物量降低、枯萎等症状。在所有品种中,品种IV的转移系数最大,根部的砷更多被转移到地上部从而减少了对根系的伤害。这可能是品种IV在高浓度砷胁迫下根冠比仍有所增加的原因。富集系数随营养液中砷浓度的增加而增加,通过该指标可直观地反映出不同品种对砷吸收能力的大小。品种II的转移系数和富集系数在5个品种中均最小,说明品种II吸收及向上转砷的能力均最弱。这是品种II地上部砷含量较其他品种低的主要原因。

### 2.4 苋菜不同部位磷含量与地上部砷含量的关系

As(V)主要通过磷酸盐转运蛋白进入植物根系,磷与砷在植株内、外都存在紧密的联系。结果表明不同条件下5种苋菜地上部磷含量存在显著差异,不同苋菜品种对磷的吸收能力不同(图3)。从图4可以看出,砷浓度为 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时苋菜地上部磷含量与地上部砷含量有显著相关性( $r=0.881, P<0.05$ ),而当砷浓度为 $4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时苋菜地上部磷含量与地上部砷含量的相关性不显著,但是相关系数达到0.816。该结果表明,在含砷营养液中生长的苋菜,磷吸收能力强的品种其体内砷的含量大于磷吸收能力弱的品种。种子作为植物的生殖器官携带该种植物全部遗传信息,种子的某些指标可能反映出植物体具有的特征。上述试验结果表明,对磷吸收能力强的品种对砷的吸收能力也强,通过分析苋菜种子中磷含量与地上部砷含量的相关性(图4),发现苋菜种子中磷含量与培养液砷浓度为 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时地上部砷含量呈显著正相关( $r=0.937^*$ ),与培养液砷浓度为 $4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时地上部的砷含量呈极显著正相关( $r=0.971^{**}$ )。该结果说明:苋菜种子中磷含量高的品种,其子代的地上部砷含量也

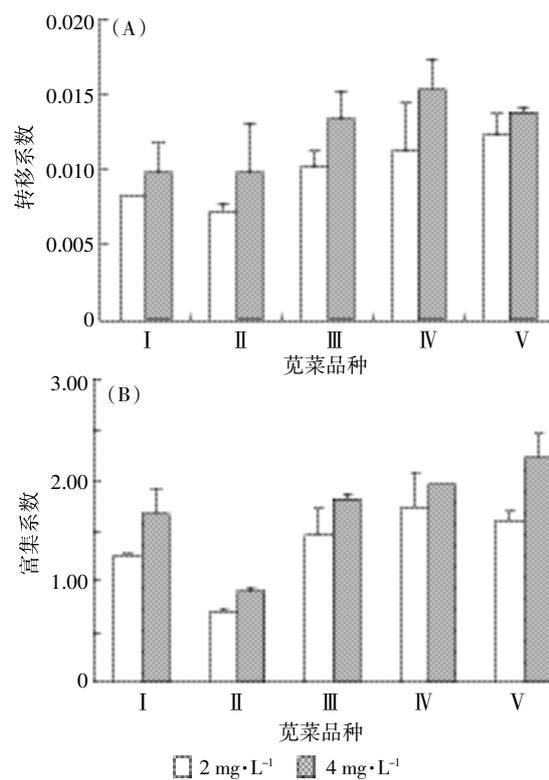


图2 五种苋菜不同砷浓度处理下的转移系数和富集系数比较  
Figure 2 The translocation factors and the bioaccumulation factors of five amaranth species exposed to different concentrations of As

高,通过种子中磷含量的多少可在一定程度上预测不同品种苋菜对砷的吸收能力。对比来看(表2、图3),不同品种苋菜种子中磷含量的差异小于其地上部砷含量的差异,种子中磷含量最大值与最小值相差仅1.2倍,而地上部砷含量最大值与最小值相差约2.3倍,故该方法的可靠性还有待进一步验证。

## 3 讨论

### 3.1 砷对苋菜生长及积累的影响

砷并非植物生长的必需元素,其对植物生长的影响往往表现为低浓度促进生长、高浓度抑制生长<sup>[17]</sup>。丁枫华等<sup>[18]</sup>在水培条件下研究了砷对19种常见蔬菜

表2 不同砷浓度处理下五种苋菜地上部和地下部砷含量( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

Table 2 The arsenic contents in the aerial parts and roots of five amaranth species with different arsenic concentration ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

苋菜品种 Species	地上部 Aerial part			地下部 Root		
	$0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$
I	$0.58\pm 0.16$	$2.50\pm 0.04\text{b}$	$6.62\pm 1.23\text{b}$	$2.30\pm 0.82$	$305.20\pm 5.00\text{c}$	$673.07\pm 47.23\text{c}$
II	$0.24\pm 0.05$	$1.39\pm 0.09\text{a}$	$3.56\pm 1.13\text{a}$	$1.73\pm 0.02$	$192.76\pm 12.12\text{a}$	$362.76\pm 55.17\text{a}$
III	$0.30\pm 0.11$	$2.92\pm 0.62\text{c}$	$7.25\pm 0.25\text{bc}$	$1.78\pm 0.75$	$287.82\pm 26.18\text{b}$	$543.94\pm 71.54\text{b}$
IV	$0.34\pm 0.17$	$3.47\pm 0.82\text{c}$	$7.78\pm 0.06\text{bc}$	$1.78\pm 0.15$	$307.50\pm 2.99\text{c}$	$508.55\pm 89.63\text{b}$
V	$0.34\pm 0.21$	$3.18\pm 0.27\text{c}$	$8.85\pm 1.16\text{c}$	$1.33\pm 0.39$	$284.15\pm 19.47\text{b}$	$642.70\pm 60.50\text{c}$

的影响,结果表明溶液中砷浓度较低时(0.1、1 mg·L<sup>-1</sup>)促进大多数蔬菜的生长,砷浓度较高时(10 mg·L<sup>-1</sup>)对蔬菜的生长主要起抑制作用。Mathieu<sup>[9]</sup>通过水培方法研究了砷对苋菜、生菜等蔬菜生长的影响,与对照相比,营养液砷浓度为1 mg·L<sup>-1</sup>时生菜地上部生物量显著增加,砷促进了生菜的生长,而在此砷浓度下苋菜生物量显著减少,生长受到抑制。本次试验结果表明,溶液中砷的浓度为2 mg·L<sup>-1</sup>时对品种Ⅲ、Ⅴ的生长有

促进作用,对其他品种的生长起抑制作用,而溶液中砷的浓度增至4 mg·L<sup>-1</sup>时对所有苋菜品种的生长均有显著抑制作用。这说明,作物对砷的耐性不仅与作物品种有关还随砷浓度的变化而变化。一般认为,砷胁迫下植物的光合作用减弱、过氧化酶活性下降,可溶性蛋白质含量减少,这些生理上的变化是引起植物生物量变化的直接原因<sup>[20]</sup>。

植物不同种类或品种对砷的吸收能力差异很大,如据肖细元等<sup>[7]</sup>总结国内外相关研究结果,认为主要类型蔬菜砷含量由大到小依次为:叶菜类>根茎类>茄果类>鲜豆类,叶菜类蔬菜的砷富集系数最高;而在水稻中则以粳稻富集砷的能力较弱,杂交稻对砷的富集能力较强。作物中的砷是人体砷暴露的重要途径,种植砷低吸收作物可降低砷对人体的健康风险<sup>[21]</sup>。本研究表明,5种苋菜地上部砷含量差异显著,其大小顺序为白圆叶苋菜≈红柳叶苋菜>花红柳叶苋菜>花红苋菜>严选红圆叶苋菜,即不同品种苋菜对砷的吸收能力不同。若以本研究中苋菜的平均含水率为90%计算,当营养液砷浓度为2 mg·L<sup>-1</sup>时,所有品种苋菜鲜重砷含量均低于国家标准;当营养液砷浓度为

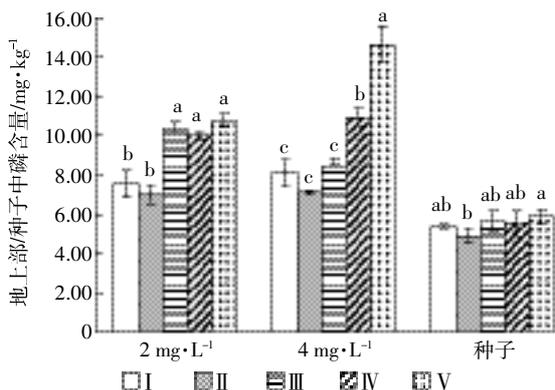
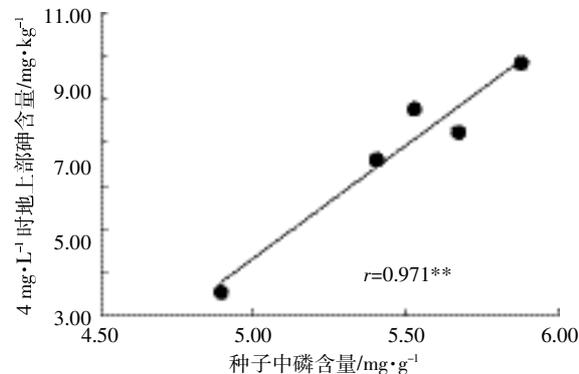
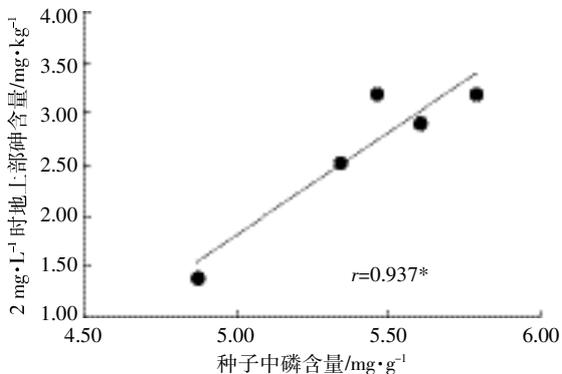
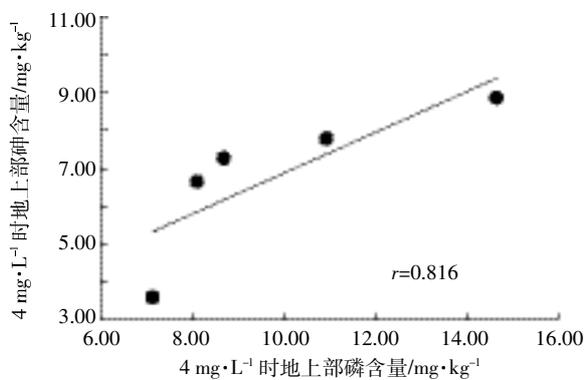
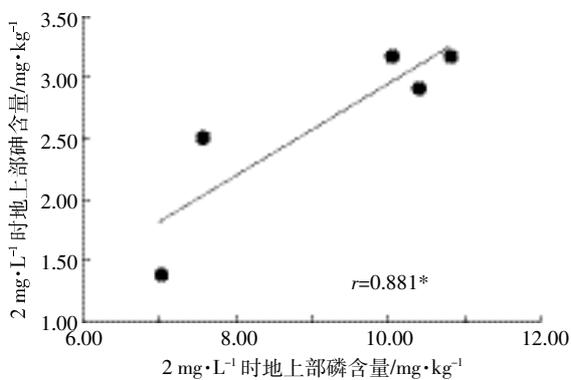


图3 种子和不同砷浓度处理下地上部磷含量

Figure 3 The amount of phosphorus in seeds and shoot with different arsenic concentrations treated



表示显著相关( $P<0.05$ ), \*\* 表示极显著相关( $P<0.01$ )

means significant correlation( $P<0.05$ ), \*\* means highly significant correlation( $P<0.01$ )

图4 地上部、种子中磷含量与不同砷浓度处理下地上部砷含量之间的关系

Figure 4 Relationship between the amount of phosphorus in shoot or seeds and the amount of arsenic in shoot treated with different arsenic concentrations

4 mg·L<sup>-1</sup>时,则仅严选红圆叶苋菜地上部砷含量低于国家标准,其他四个品种均高于国家标准,即不符合食品安全的要求。通过本次试验,初步确定严选红圆叶苋菜对砷的耐性较强、富集砷的能力最弱,可在砷污染地区推广种植,但该结果亦有待通过大田试验进一步验证。

### 3.2 苋菜体内磷与砷的相互关系

大量试验结果证明:As(V)通过根系细胞膜上的磷酸盐转运蛋白进入植物根系<sup>[22]</sup>,磷酸盐转运蛋白对磷的亲合能力一般强于砷但并非专一性蛋白,植物在吸收磷酸盐时会将AsO<sub>4</sub><sup>3-</sup>也吸收进体内,进入植物体的As(V)会与P竞争取代ATP上的磷,形成不稳定的ADP-As使细胞能量流遭到破坏<sup>[23]</sup>。Zhang等<sup>[24]</sup>通过基因测序研究发现,控制P吸收与控制As(V)吸收的基因是同一个基因。这也是在植物吸收系统中磷与砷属于竞争关系的重要原因,大量研究表明营养液中增加磷含量能减少植物对砷的吸收,增强植物对砷的耐受能力。本试验结果表明,不同砷浓度处理下地上部磷含量与地上部砷含量存在显著相关性,说明对磷吸收能力强的品种对砷的吸收能力也强。这可能与磷砷共用一个转运通道及其吸收受同一个基因控制有关。Meharg等<sup>[25]</sup>研究发现,两种耐砷能力不同的绒毛草地上部砷含量和磷含量具有一致性,并通过试验证明耐砷品种通过抑制P转运酶的活性减少了对磷和砷的吸收。这与本试验结果相似。但是Lu等<sup>[26]</sup>在研究水稻中磷砷含量关系时发现茎叶中的磷砷含量关系相反,即茎叶中磷含量高的品种砷含量反而低,并提出可通过培育和筛选茎叶中磷含量高的品种减少水稻中砷的含量;杨玲等<sup>[27]</sup>对水稻茎叶中磷、砷含量的研究也有类似的结果。这些研究结果与本试验结果相反,其原因可能是淹水条件下土壤中的砷主要是As(III),而As(III)主要通过水、硅通道蛋白被作物根系吸收<sup>[28]</sup>。砷易变价的特性及水稻种植时可能出现的水旱交替不稳定现象,增加了这方面研究的难度和不确定性。张堃<sup>[29]</sup>研究了芹菜10个品种种子中镉含量与地上部镉含量的关系,结果表明芹菜高积累品种与低积累品种种子中镉含量的差异为7.8倍,大于其地上部镉含量的差异,并且种子与地上部镉含量一致。因此,可通过芹菜种子中镉含量筛选芹菜的镉低吸收品种。本试验中,通过研究苋菜种子中磷含量与地上部砷含量的关系,得出两者之间存在显著正相关,即对磷吸收能力强的苋菜品种对砷的吸收能力也强。本试验涉及的苋菜仅5个品种,磷、砷含量关系在统计

学上的说服力有限,并且不同品种之间磷含量的差异小于砷含量的差异,因此有必要增加品种数量来进一步验证苋菜中磷砷含量之间的关系,在以后的研究中还应涉及不同种类蔬菜(比如白菜、芹菜、生菜等)之间的磷砷含量关系,为砷低吸收蔬菜的筛选提供可靠的理论支持,提高筛选效率和准确性。

## 4 结论

(1)花红苋菜、严选红圆叶苋菜、白圆叶苋菜地上部生物量随砷浓度增加而减少,花红柳叶苋菜、红柳叶苋菜地上部生物量随砷浓度增加先增大(或不变)后减少。

(2)苋菜不同品种地上部砷含量差异显著,两种砷浓度处理下,五种苋菜地上部砷含量的大小为白圆叶苋菜≈红柳叶苋菜>花红柳叶苋菜>花红苋菜>严选红圆叶苋菜。

(3)不同苋菜品种之间地上部和种子中磷含量的差异小于地上部砷含量的差异,相关性分析表明苋菜地上部和种子中磷含量与地上部砷含量存在显著或极显著正相关。

### 参考文献:

- [1] Joseph T, Dubey B, McBean E A. Human health risk assessment from arsenic exposures in Bangladesh[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 527: 552-560.
- [2] 环境保护部,国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[EB]. [2014-04-17] [http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417\\_270670.htm](http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm).  
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. National soil pollution survey bulletin[EB]. [2014-04-17] [http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417\\_270670.htm](http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm).
- [3] 曾希柏,苏世鸣,吴翠霞,等.农田土壤中砷的来源及调控研究与展望[J]. *中国农业科技导报*, 2014, 16(2): 85-91.  
ZENG Xi-bai, SU Shi-ming, WU Cui-xia, et al. Research and prospect of arsenic source and its regulation in arable land soil[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2014, 16(2): 85-91.
- [4] Ramirez-Andreotta M D, Brusseau M L, Artioli J F, et al. A greenhouse and field-based study to determine the accumulation of arsenic in common homegrown vegetables grown in mining-affected soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 443: 299-306.
- [5] Rahman M A, Hasegawa H, Rahman M M, et al. Arsenic accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) varieties of Bangladesh: A glass house study[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2007, 185(1-4): 53-61.
- [6] Norton G J, Pinson S R M, Alexander J, et al. Variation in grain arsenic assessed in a diverse panel of rice (*Oryza sativa*) grown in multiple sites [J]. *New Phytologist*, 2012, 193(3): 650-664.
- [7] 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

- 种富集能力比较[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.
- [8] 赖长鸿, 刘亚玲, 贺鸿志, 等. 无机三价砷对生菜的生态毒性及其生物积累[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(5):831-836.  
LAI Chang-hong, LIU Ya-ling, HE Hong-zhi, et al. Eco-toxicity and accumulation of inorganic trivalent arsenic in lettuce[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(5):831-836.
- [9] Mathieu N K, 曾希柏, 李莲芳, 等. 几种叶类蔬菜对砷吸收及累积特性的比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(3):485-490.  
Mathieu N K, ZENG Xi-bai, LI Lian-fang, et al. A Screening study of five leafy vegetable species for tolerance and accumulation of toxic inorganic Arsenic (V) under hydroponic conditions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(3):485-490.
- [10] 蔡保松, 陈同斌, 廖晓勇, 等. 土壤砷污染对蔬菜砷含量及食用安全性的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(4):711-717.  
CAI Bao-song, CHEN Tong-bin, LIAO Xiao-yong, et al. Arsenic concentrations in soils and vegetables and their risk assessments in highly contaminated area in Hu'nan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(4):711-717.
- [11] 胡莹, 黄益宗, 刘云霞. 砷污染土壤中不同基因型水稻根表铁膜的形成及其对砷吸收和转运影响[J]. 生态毒理学报, 2013, 8(6):923-930.  
HU Ying, HUANG Yi-zong, LIU Yun-xia. Genotypic differences in iron plaque formation on root surface and their effect on arsenic uptake and translocation in rice (*Oryza sativa* L.) grown in arsenic contaminated soil[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2013, 8(6):923-930.
- [12] 吴川, 莫竞瑜, 薛生国, 等. 不同渗氧能力水稻品种对砷的耐性和积累[J]. 生态学报, 2014, 34(4):807-813.  
WU Chuan, MO Jing-yu, XUE Sheng-guo, et al. Characteristics of arsenic (As) tolerance and accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) genotypes with different radial oxygen loss[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(4):807-813.
- [13] Wang L H, Duan G L. Effect of external and internal phosphate status on arsenic toxicity and accumulation in rice seedlings[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(3):346-351.
- [14] Wu F Y, Wu S C, Deng D, et al. Effects of phosphate on arsenate uptake and translocation in nonmetallophilous and metallophilous populations of *Pteris vittata* L. under solution culture[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2015, 17(9):841-846.
- [15] 郭世荣. 无土栽培学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003:134-136.  
GUO Shi-rong. Soilless Culture[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2003:134-136.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000:312-314.  
LU Ru-kun. Analysis method of soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Sciencetech press, 2000:312-314.
- [17] Shri M, Kumar S, Chakrabarty D, et al. Effect of arsenic on growth, oxidative stress, and antioxidant system in rice seedlings[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, 72(4):1102-1110.
- [18] 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.  
DING Feng-hua, LIU Shu-xin, LUO Dan, et al. Arsenic toxicity to nineteen vegetable species in solution culture[J]. *Environment Chemistry*, 2010, 29(3):439-443.
- [19] Kumwimba M N. 砷低吸收蔬菜的筛选及吸收动力学研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013:14-17.  
Kumwimba M N. Screening of leafy vegetable cultivars with low arsenic uptake and uptake kinetic of arsenic[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013:14-17.
- [20] 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.  
LIU Quan-ji, SUN Xue-cheng, HU Cheng-xiao, et al. Growth and photosynthesis characteristics of wheat (*Triticum aestivum* L.) under arsenic stress condition[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(2):854-859.
- [21] Smith E, Juhasz A L, Weber J. Arsenic uptake and speciation in vegetables grown under greenhouse conditions[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2009, 31(1):125-132.
- [22] Abedin M J, Feldmann J, Meharg A A. Uptake kinetics of arsenic species in rice plants[J]. *Plant Physiology*, 2002, 128(3):1120-1128.
- [23] Meharg A A, Hartley-Whitaker J. Arsenic uptake and metabolism in arsenic resistant and nonresistant plant species[J]. *New Phytologist*, 2002, 154(1):29-43.
- [24] Zhang J, Zhu Y G, Zeng D L, et al. Mapping quantitative trait loci associated with arsenic accumulation in rice (*Oryza sativa*) [J]. *New Phytologist*, 2008, 177(2):350-356.
- [25] Meharg A A, Naylor J, Macnair M R. Phosphorus nutrition of arsenate-tolerant and nontolerant phenotypes of velvetgrass[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23(2):234-238.
- [26] Lu Y, Dong F, Deacon C, et al. Arsenic accumulation and phosphorus status in two rice (*Oryza sativa* L.) cultivars surveyed from fields in South China[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(5):1536-1541.
- [27] 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. Effect of phosphorus additions on grain yield, biomass and P and As concentration in different organs of three rice cultivars with different P-efficiencies under As-contaminated conditions[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(8):1627-1635.
- [28] 彭小燕, 王茂意, 刘凤杰, 等. 水稻砷污染及其对砷的吸收和代谢机制[J]. 生态学报, 2010, 30(17):4782-4791.  
PENG Xiao-yan, WANG Mao-yi, LIU Feng-jie, et al. Arsenic contamination, uptake and metabolism in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(17):4782-4791.
- [29] 张堃. 两种叶菜镉, 铅低积累品种筛选及其快速鉴别方法研究[D]. 广州: 中山大学, 2011:85-91.  
ZHANG Kun. Genotype variations in Cd and Pb accumulations and rapid screening methods for low Cd accumulative cultivars in two leaf using vegetables[D]. Guangzhou: Sun Yat-Sen University, 2011:85-91.