

# 基于水培毒性测试的砷对 19 种常见蔬菜的毒性\*

丁枫华<sup>1, 2</sup> 刘术新<sup>3</sup> 罗丹<sup>1</sup> 王果<sup>1\*\*</sup> 张娟<sup>1</sup>

(1 福建农林大学资源与环境学院, 福州, 350002; 2 丽水学院, 丽水, 323000; 3 丽水职业技术学院, 丽水, 323000)

**摘 要** 通过水培苗期毒性试验, 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, 砷对大部分蔬菜的影响存在一个较低浓度 ( $0.1$  和  $1.0 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ) 的刺激效应和高浓度 ( $10.0 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$  以上) 的抑制效应. 砷对蔬菜地上部生物量的影响普遍较根部明显. 蔬菜地上部鲜重对砷胁迫相对敏感, 性状稳定, 可作为蔬菜对砷敏感性的筛选指标. 不同种类蔬菜  $\text{EC}_{20}$  值的变化范围为  $0.20$ — $42.87 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ . 根据表观症状和  $\text{EC}_{20}$  对蔬菜砷敏感性分别进行分类, 两种分类结果基本一致. 黄瓜、红豇豆、苋菜、辣椒、茄子确定为砷敏感蔬菜, 可以作为确定土壤和植物中砷的毒害临界值的基础生态受体.

**关键词** 砷, 蔬菜, 敏感性,  $\text{EC}_{20}$ .

土壤中过量暴露的砷可危害植物的生长发育, 引起植物生长、生物性状、吸收特征的异常变化<sup>[1, 2]</sup>. 李勋光等<sup>[3]</sup>通过土培试验研究了不同的砷处理对水稻、小麦的毒害效应以及砷在植物体内的分布情况, 认为水稻对砷的毒性较早作敏感, 毒害症状也比较明显. Warren 等<sup>[4]</sup>通过田间试验研究了高污染 ( $748 \text{ mgAs} \cdot \text{kg}^{-1}$  土) 土壤中甜菜、甘蓝、花椰菜、莴苣、土豆、萝卜和菠菜对砷的生物利用性的差异. 由于普遍认为水稻对砷相对敏感, 前人对植物受砷毒害的研究多针对水稻, 而对蔬菜砷毒害敏感性方面缺乏系统性研究. 对于已有的报导<sup>[4-15]</sup>, 由于毒性测试方法和目的的差异, 结果间也不宜直接进行比较. 植物对污染物的敏感程度因吸收动力学、内部螯合、生物转化、生物化学受体及其再生和修复效率等机制的差异而存在种类差别<sup>[11]</sup>. 因此, 在同一条件下研究砷对不同植物种类的毒害效应, 并通过一定的指标筛选出砷敏感植物和耐性植物的工作具有一定的意义.

本研究在 8 个植物科中选取 19 种常见蔬菜为试验材料, 通过水培苗期毒理学试验, 研究蔬菜幼苗在砷胁迫下生长性状敏感性的差异. 筛选出的砷高敏感蔬菜, 可作为确定土壤和植物中砷的毒害临界值的基础生态受体, 由于砷敏感植物对砷的耐受能力差, 也可作为土壤砷污染的指示植物.

## 1 实验部分

### 1.1 供试材料

供试蔬菜: 十字花科: 大白菜 (*B. brassica pekinensis* Rupr.), 青菜 (*B. brassica chinensis* L. 菜心、小白菜、油白菜)、芥菜 (*B. brassica juncea* Coss.), 花椰菜 (*B. brassica oleracea* L. var. *botrylis* L.), 甘蓝 (*B. brassica oleracea* L. var. *capitata* L.), 萝卜 (*Raphanus sativus* L. 白萝卜、红萝卜); 茄科: 番茄 (*Lycopersicon esculentum* Mill.), 茄子 (*Solanum melongena* L.), 辣椒 (*Capsicum annuum* L.); 菊科: 莴苣 (*Lactuca sativa* L. 生菜、油麦); 旋花科: 壅菜 (*Lepanoea aquatica* Forsk.); 豆科: 豇豆 (*Vigna unguiculata* L. 红豇豆); 伞形科: 芹菜 (*Apium graveolens*); 苋科: 苋菜 (*Amaranthus mangostanus* L.); 葫芦科: 黄瓜 (*Cucumis sativus* L.).

### 1.2 实验方法

选取子粒饱满、均匀的种子约 200 粒, 依次用自来水清洗, 1% 次氯酸钠消毒 20 min, 去离子水清洗. 取直径 10cm 的玻璃培养皿, 内铺两层滤纸, 湿润. 将适当浸泡的种子放入培养皿中. 置于 HP400GS 型全智能人工植物气候箱 ( $22 \pm 2$ , ( $45 \pm 7$ )% RH, 避光) 中催芽. 待种子露白 ( $2 \text{ mm}$ )

2009 年 11 月 1 日收稿.

\*中央环保专项基金 (财建 [2007] 661 号); 浙江省教育厅科研项目 (20070551) 资助.

\*\*通讯联系人, E-mail: gwang572003@yahoo.com.cn

后挑选长势一致的移入直径为 5cm 的装有洗净河沙的穴盘内, 自然光照. 出苗后, 早晚两次浇 1/4 Hoagland 营养液 ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  47.2  $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 、 $\text{KNO}_3$  51.0  $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  19.6  $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$  5.5  $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 、 $\text{Fe-EDTA}$  13.02  $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 、 $\text{H}_3\text{BO}_4$  2.86  $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 、 $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  1.81  $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 、 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  0.08  $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 、 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.22  $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 、 $\text{H}_2\text{MoO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  0.09  $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ). 培养到两叶一心时, 选择长势均匀的小苗移栽到装有 500ml 1/4 Hoagland 营养液的 PVC 罐 (高 14cm, 直径 7.5cm, 不透光) 中, 稳定 7d 使小苗适应水环境, 再更换为全营养液培养 3d, 让小苗适应全营养液环境, 长势平稳, 受外界影响较小, 此时开始分别添加砷处理.

根据预实验结果, 砷浓度设为 0、0.1、1.0、5.0、10.0、20.0、50.0、100.0、200.0  $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ , 每个处理设 3 个重复, 每 3d 换一次营养液. 营养液用  $1\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$  的 NaOH 或 HCl 溶液调节 pH 值至 5.8, 植物在温室培养, 温度 25—35℃, 光源为自然光, 所有水培罐每天随机排列, 并每天通气一次. 处理两周后收获<sup>[5, 12, 13]</sup>.

### 1.3 样品分析

添加砷后的培养期间, 每天记录作物外部形态 (根、茎、叶) 变化. 收获时量株高和根长, 将蔬菜地上部和根分开, 分别称鲜重. 置于烘箱 95℃ 杀青 30min, 65℃ 烘干至恒重, 分别称量烘干重.

参考 Metwally 等的方法<sup>[2]</sup>, 将胁迫条件下生物各性状统一以耐性指数表示, 计算方法如下:

$$\text{耐性指数} = \frac{\text{处理}}{\text{对照}} \times 100\%$$

参考 Anderson 等的方法<sup>[11, 14-16]</sup>, 对不同种类蔬菜进行砷胁迫的剂量效应最优模型拟合, 计算  $\text{EC}_{20}$  值.

试验数据的处理和分析采用 DPS 软件和 Maple 7.0 软件.

## 2 结果与讨论

### 2.1 砷对蔬菜的毒害效应

#### 2.1.1 砷对蔬菜的毒害症状

在不同浓度砷胁迫下, 不同科属的蔬菜所表现的毒害症状具有一定的差异 (表 1). 其中茄科、旋花科、豆科、葫芦科、菊科对砷毒害的表观症状比较明显, 并且也表现得更加敏感, 而十字花科和伞形科的蔬菜对砷毒害可见症状均不太明显. 但植物受砷毒害后普遍的症状均为根部生长受抑. 这可能与植物根系受砷毒害有关, 砷首先抑制了根系的活性, 阻碍作物中水分输送, 降低伤流, 更进一步抑制地上部养分的供给<sup>[10]</sup>. 因此, 在植物轻度砷胁迫时表现为侧根须根增多, 地上部分可见症状则不明显; 严重毒害时根部发褐、发黑, 根体积和根重下降, 地上部分生长受到不同程度抑制, 植株矮小, 最后叶片失水萎蔫或枯萎. 这些结果都表明可以选取植物根长和地上部生物量作为砷毒性测试效应指标.

表 1 各种蔬菜砷毒害的症状表现

Table 1 The symptoms of arsenic toxicity in various vegetables

所属植物科	蔬菜名称	表观毒害症状
菊科	生菜、油麦菜	轻度 (0.1、1.0 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ) 受害, 长势良好; 中度 (5.0、10.0 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ) 受害时植株矮化, 根短小发褐; 严重 (20.0 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 及以上) 受害时叶脉基部出现锈斑, 根呈锈色.
十字花科、伞形科	大白菜、小白菜、油白菜、芥菜、花椰菜、甘蓝、萝卜、红萝卜、菜心、芹菜	轻度 (0.1、1.0 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ) 受害, 长势良好甚至更好; 中度 (5.0、10.0 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ) 受害时侧根丛生, 地上可见症状不明显; 严重 (20.0 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 及以上) 受害时植株矮化, 下部叶萎蔫黄化, 上部叶叶脉间失绿黄化, 叶片卷曲或皱缩, 主根受抑, 侧根须根增多, 并呈褐色.
茄科、豆科、苋科、旋花科	蕹菜、茄子、辣椒、红豇豆、苋菜、番茄、黄瓜	轻度 (0.1、1.0 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ) 受害, 长势良好甚至更好; 中度 (5.0、10.0 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ) 受害时, 植株矮化, 新叶脉间黄化, 根稀少发褐根尖部分坏死; 严重 (20.0 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 及以上) 受害时从下部叶片开始萎蔫到整株死亡, 根发黑坏死.

在不同浓度砷胁迫下，高砷胁迫幼苗最先出现毒害症状，并随着营养液中砷浓度的降低，幼苗出现毒害症状的时间延长，毒害症状也有所减轻。但不同种类蔬菜所表现出来的表观敏感性和抗耐性有很大的区别。各种蔬菜在低浓度 ( $0.1$  和  $1.0 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ) 砷处理下均没有明显的毒害症状，甚至发现苋菜、黄瓜、芥菜、茄子、番茄、红萝卜的长势要好于对照，这与微量砷可以刺激植物生长发育的研究结论相一致<sup>[9]</sup>。  $5.0 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$  砷处理 7d后红豇豆、辣椒的根部首先出现毒害症状，主根的生长受到不同程度的抑制，侧根和须根增多较明显，但地上部茎叶几乎未表现出可见的毒害症状。  $10.0 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$  砷处理 10d后所有种类蔬菜的根部均出现不同程度的毒害症状。在  $50.0 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$  砷处理 2d后苋菜、黄瓜、蕹菜下部叶失水萎蔫，根部组织逐渐坏死并呈黑腐状，10d后整株死亡，而十字花科的蔬菜如芥菜、萝卜仍然生长良好。这些结果表明不同物种对砷毒害的敏感浓度有较大区别，出现毒害症状的时间及程度各有差异，毒性阈值也各不相同。因此，可以在一个设定的较大砷胁迫浓度区间 ( $0.1$ — $200.0 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ) 范围内，以不同种类蔬菜毒性表观症状的结果作为初步筛选测试效应的指标。

### 2.1.2 砷对蔬菜生长状况的影响

对比同浓度砷胁迫不同种类蔬菜的株高、根长、地上部生物量 (鲜重、干重) 和根生物量 (鲜重、干重) 6个毒性效应指标的耐性指数和基于这些效应指标的  $EC_{20}$  值，发现低浓度砷对大部分蔬菜的生长都有不同程度的促进作用，但随着浓度的升高，砷逐渐抑制蔬菜的株高、根长以及生物量 (图 1)，其中以红豇豆、苋菜、茄子、蕹菜、辣椒等蔬菜的耐性指数下降最为显著。如在  $5.0 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$  砷处理下，苋菜根长和地上部鲜重耐性指数分别下降了 42.39% 和 31.97%，红豇豆的株高耐性指数下降了 31.09%。结果显示，砷对植物株高、根长、地上部和地下生物量存在不同程度的抑制，可以通过这些效应指标判断植物对砷毒性的敏感程度。已有不少学者以重金属对植物生长的抑制程度判断其受害状况<sup>[1, 14—17]</sup>。考虑本试验研究的是基于水培条件下砷对蔬菜幼苗的毒害效应，砷低浓度胁迫时，辣椒、红豇豆等较敏感的蔬菜幼苗已经受害，生物量减少就可达 10% 以上，而多数蔬菜地上部生物量减少 50% 时，受害已经十分严重。因此，以  $EC_{20}$  值做为筛选砷敏感蔬菜的指标较为合理。

比较不同浓度砷胁迫下蔬菜的根冠比 (根冠比 = 根干重 / 地上部干重)，发现不同种类蔬菜对砷的响应存在较大差异 (图 2)，主要有三种表现类型：生菜、黄瓜等的根冠比随砷处理浓度的升高而降低，说明砷对生菜和黄瓜根部的影响要比地上部显著；红豇豆、蕹菜等的根冠比随砷处理浓度的升高而升高，而且升高的幅度比较大，表明砷对它们地上部生长的抑制作用较强；甘蓝、菜心、番茄、芥菜、花椰菜、苋菜等大部分蔬菜升高的幅度则相对比较平缓，但仍表明砷对这些蔬菜地上部生物量的影响较根部明显。并且考虑到植物根部在水培环境下容易受到如空间、水溶态氧等因素的干扰，造成性状指标相对不稳定。因此确定以地上部鲜重作为蔬菜对砷敏感性的首要筛选指标。

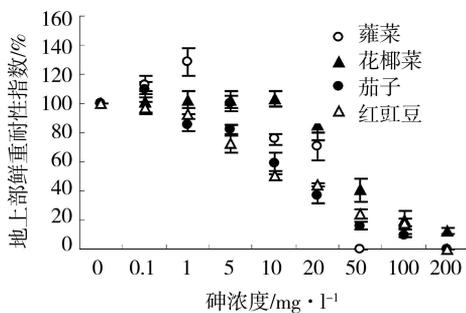


图 1 蔬菜地上部鲜重耐性指数与砷的关系

Fig.1 Relationship between the tolerance index of shoot fresh weight of vegetable and arsenic concentration

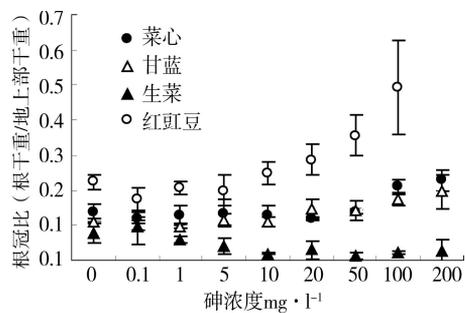


图 2 蔬菜根冠比与砷处理浓度的关系

Fig.2 Correlation between root-shoot ratio and arsenic concentration

## 2.2 砷敏感蔬菜分类

### 2.2.1 根据表观症状对蔬菜砷敏感性的分类

根据水培期间各种蔬菜出现毒害的时间、出现毒害的最低浓度及毒害表观症状的轻重程度将蔬菜砷敏感性进行了分类，把蔬菜大致分为 4 类：砷敏感蔬菜、砷较敏感蔬菜、砷较不敏感蔬菜、砷不敏

感蔬菜(表 2)。

表 2 根据症状表现的蔬菜砷敏感性分类

Table 2 Classification of arsenic sensitivity of vegetables according to the symptoms

分类	蔬菜种类	症状表现
砷敏感蔬菜	莼菜、黄瓜、红豇豆、 苋菜、辣椒、茄子	出现毒害的最低浓度为 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ , 黄瓜新叶脉间失绿黄化, 侧根丛生, 苋菜、 红豇豆、莼菜根量稀少发褐, $50.0 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以上砷处理 10d枯萎或死亡。
砷较敏感蔬菜	甘蓝、油白菜、大白 菜、番茄	出现毒害的最低浓度为 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ , 侧根须根增多; $20.0 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 砷处理 10d根 量稀少, 长势严重受抑; $50.0 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 生长停滞。
砷较不敏感蔬菜	生菜、油麦菜、小白 菜、芹菜	出现毒害的最低浓度为 $10.0 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ , 处理 7d生菜、油麦菜根系发褐。
砷不敏感蔬菜	花椰菜、菜心、萝卜、 红萝卜、芥菜	出现毒害的最低浓度为 $10.0 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ , 处理 10d侧根须根增多, 其余可见症状不 明显, $50.0 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 处理 4d长势稍受抑制。

### 2.2.2 根据 $EC_{20}$ 值对蔬菜砷敏感性的分类

考虑到不同种类蔬菜在砷胁迫下毒性效应的差异, 本研究尝试拟合砷和植物间剂量-效应的相关模型, 并依据地上部鲜重的  $EC_{20}$ 值  $0.20\text{—}42.87 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 对 19种蔬菜砷敏感性进行多目标聚类(表 3)。结果表明, 辣椒、茄子、苋菜、青菜、黄瓜、甘蓝、红豇豆为砷敏感蔬菜, 分析结果与根据表观症状对蔬菜砷敏感性的分类结果基本一致。

表 3 不同种类蔬菜地上部鲜重耐性指数与砷浓度间关系及相应的  $EC_{20}$  ( $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ) 分类

Table 3 Correlation between the shoot fresh weight tolerance index of different vegetable species, and arsenic concentration and corresponding  $EC_{20}$

分类	蔬菜	拟合方程	$R^2$	$EC_{20}$	蔬菜	拟合方程	$R^2$	$EC_{20}$
砷敏感蔬菜	辣椒	$y^{**} = -0.0778 \ln(x) + 0.6744$	0.9117	0.20	黄瓜	$y^{**} = -0.1769 \ln(x) + 1.0581$	0.7788	4.30
	茄子	$y^{**} = -0.152 \ln(x) + 0.8523$	0.9291	1.41	甘蓝	$y^{**} = 4 \times 10^{-5} x^2 - 0.0119x + 0.8539$	0.9119	4.60
	苋菜	$y^{**} = 0.0019x^2 - 0.0639x + 1.0203$	0.8988	3.90	红豇豆	$y^{**} = 0.0001x^2 - 0.0221x + 0.9083$	0.9113	5.01
	油白菜	$y^{**} = 3 \times 10^{-5} x^2 - 0.01x + 0.8406$	0.9439	4.11				
砷较敏感蔬菜	油麦菜	$y^{**} = 4 \times 10^{-5} x^2 - 0.0114x + 0.8868$	0.9615	7.83	莼菜	$y^{**} = 1.1551e^{-0.0327x}$	0.9649	11.23
	大白菜	$y^{**} = 0.9107e^{-0.0155x}$	0.8033	8.36	芹菜	$y^{**} = 2 \times 10^{-5} x^2 - 0.0071x + 0.8892$	0.7846	13.04
	番茄	$y^{**} = 1.0537e^{-0.0183x}$	0.8588	15.05	生菜	$y^{**} = 3 \times 10^{-5} x^2 - 0.0106x + 0.9891$	0.9538	18.84
砷较不敏感蔬菜	小白菜	$y^{**} = 0.8929e^{-0.0065x}$	0.7387	16.90	花椰菜	$y^{**} = 4 \times 10^{-5} x^2 - 0.0131x + 1.0529$	0.9755	20.60
	红萝卜	$y^{**} = -0.1463 \ln(x) + 1.2165$	0.9119	17.23	菜心	$y^{**} = 0.926e^{-0.0053x}$	0.8595	20.67
砷不敏感蔬菜	萝卜	$y^{**} = -0.0821 \ln(x) + 0.989$	0.8345	24.40	芥菜	$y^{**} = 1.1419e^{-0.0083x}$	0.9366	42.87

注:  $y^{**}$ 表示达 1%极显著水平,  $n=9$ 。

## 3 结论

在水培苗期毒性测试条件下, 不同种类蔬菜对不同浓度砷胁迫所表现出来的表观敏感性有很大的差异。主要症状是侧根须根增多。其中莼菜、茄子、黄瓜、红豇豆和苋菜对砷毒害的表观症状比较明显。说明蔬菜毒性表观症状的结果可以作为初步筛选测试效应的指标。

通过剂量-效应模型拟合, 比较株高、根长、地上部生物量(鲜重、干重)和根生物量(鲜重、干重)6个毒性效应指标的耐性指数和基于这些效应指标的  $EC_{20}$ 值, 结果表明蔬菜地上部鲜重对砷胁迫更敏感, 性状稳定, 可作为蔬菜对砷敏感性的筛选指标。不同种类蔬菜  $EC_{20}$ 值为  $0.20\text{—}42.87 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 。

根据表观症状对蔬菜砷敏感性的分类结果与  $EC_{20}$ 值分析结果基本一致。黄瓜、红豇豆、苋菜、辣椒、茄子为砷敏感蔬菜, 可以作为进一步确定土壤和植物中砷毒害临界值的基础生态受体。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Kapusika Lawrence A, Eskew David, Yocum Joan M, Plant Toxicity Testing to Derive Ecological Soil Screening Levels for Cobalt and Nickel [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2006, **25** (3) 865—874
- [ 2 ] Metwally Ashraf, Safonova Vera I, Belimov Andrei A et al, Genotypic Variation of the Response to Cadmium Toxicity in *Pisum Sativum* L [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2005, **56** (409) 167—178
- [ 3 ] 李勋光, 李小平, 土壤砷吸附及砷对水稻的毒性 [J]. *土壤*, 1996, (2) 98—100
- [ 4 ] Warren G P, Alloway B J, Lepp N W, Field Trials to Assess the Uptake of Arsenic by Vegetables from Contaminated Soils and Soil Remediation with Iron Oxides [J]. *The Science of the Total Environment*, 2003, **311** 19—33
- [ 5 ] Wang Lihong, Duan Guilian, Effect of External and Internal Phosphate Status on Arsenic Toxicity and Accumulation in Rice Seedlings [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21** 346—351
- [ 6 ] Schmoeger M E V, Oven M, Grill E, Detoxification of Arsenic by Phytochlaflins in Plant [J]. *Plant Physiol*, 2000, **122** (3) 793—801
- [ 7 ] Coxns, Kovar J L, Soil Arsenic Effects on Canola Seedling Growth and In Uptake [J]. *Common Soil Sci Plant*, 2001, **32** (1—2) 107—117
- [ 8 ] 郭伟, 朱永官等, 土壤施硅对水稻吸收砷的影响 [J]. *环境科学*, 2006, **27** (7) 1393—1397
- [ 9 ] Wang Lihong, Duan Guilian, Williams Paul N et al, Influences of Phosphorus Starvation on OsACR2.1 Expression and Arsenic Metabolism in Rice Seedlings [J]. *Plant Soil*, 2008, **10** 1007—1018
- [ 10 ] Bunzl K, Trautmannsheimer M, Schramel P et al, Availability of Arsenic, Copper, Lead, Thallium, and Zinc to Various Vegetables Grown in Slag-Contaminated Soils [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, **30** 934—939
- [ 11 ] Flower B A, Biological and Environmental Effects of Arsenic [M]. Elsevier, Amsterdam, 1983, 1—80
- [ 12 ] 刘术新, 郑海锋, 丁枫华等, 18种蔬菜品种对砷毒害敏感性的研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2009, **10** 2017—2022
- [ 13 ] 叶云山, 王果, 陈炎辉等, 铜对蔬菜的毒害效应及其土壤毒害临界值研究 [J]. *中国科技论文在线*, 2009-07-29. [http // www. paper. edu. cn](http://www.paper.edu.cn)
- [ 14 ] Sanseverino John, Eldridge Melanie L, Layton Alice C et al, Screening of Potentially Hormonally Active Chemicals Using Bioluminescent Yeast Bioreporters [J]. *Toxicological Sciences*, 2009, **107** (1) 2—134
- [ 15 ] Anderson R H, Basta N T, Lanno R P, Partitioning Species Variability from Soil Property Effects on Phytotoxicity: EC<sub>x</sub> Normalization Using a Plant Contaminant Sensitivity Index [J]. *J. Environ Qual*, 2008, **37** 1701—1709
- [ 16 ] 尹升华, 杨定清, 土壤中镍对蔬菜生长的影响及镍的临界值研究 [J]. *农业环境保护*, 1992, **11** (2) 88—90
- [ 17 ] Rooney Corinne P, Zhao Fang-Jie, McGrath Steve P, Phytotoxicity of Nickel in a Range of European Soils: Influence of Soil Properties, Ni Solubility and Speciation [J]. *Environmental Pollution*, 2007, **145** 596—605

## ARSENIC TOXICITY TO NINETEEN VEGETABLE SPECIES IN SOLUTION CULTURE

DING Feng-hua<sup>1, 2</sup>    LIU Shu-xin<sup>1</sup>    LUO Dan<sup>1</sup>    WANG Guo<sup>1</sup>    ZHANG Juan<sup>1</sup>

(1 College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, 350002, China;

2 Lishui University, Lishui, 323000, China; 3 Lishui Vocational and Technical College, Lishui, 323000, China)

### ABSTRACT

Arsenic toxicity to 19 kinds of common vegetables was studied in nutrient solution with different arsenic concentrations. The results showed that there was a stimulating effect at low levels of arsenic application (0.1 or 1.0 mg · l<sup>-1</sup>) and an inhibitory effect at high level of arsenic application (above 10.0 mg · l<sup>-1</sup>) for most of the vegetables. The effect of arsenic on shoot biomass was more obvious than that of root. Therefore, shoot fresh weight was selected to be the indicator of vegetable's sensitivity to arsenic since it was the most sensitive to arsenic stress compared to other parameters. EC<sub>20</sub> values of different types of vegetables ranged from 0.20 to 42.87 mg · l<sup>-1</sup>. The arsenic sensitivity of the vegetables are classified into two categories according to the apparent symptoms and EC<sub>20</sub> values, respectively. Red bean, amaranth, peppers and eggplant are sensitive vegetables, that can be used as ecological receptors to determine the critical value of arsenic toxicity in soil and plants.

**Keywords:** arsenic, vegetable, sensitivity, EC<sub>20</sub>.