

张 骞, 曾希柏, 白玲玉, 等. 应用水培方法筛选砷低吸收生菜的比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(4): 632–639.

ZHANG Qian, ZENG Xi-bai, BAI Ling-yu, et al. Comparison of three types of hydroponics methods in screening for low arsenic uptake lettuces[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(4): 632–639.

应用水培方法筛选砷低吸收生菜的比较研究

张 骞, 曾希柏*, 白玲玉, 王亚男, 苏世鸣, 吴翠霞

(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:为准确、快速比较作物对砷吸收能力的差异,建立适合砷低吸收作物筛选的方法,以 5 个生菜品种为对象,以土培法为基准,对旺盛生长期水培、全生育期水培和短期胁迫培养等方法下生菜砷吸收能力等进行了比较。结果表明:旺盛生长期水培、全生育期水培所得出的不同品种生菜对砷吸收能力与土培法基本一致,各品种间差异显著,且旺盛生长期以后生菜地上部砷含量不再随时间和生物量的变化而出现显著变化;短期胁迫培养下各品种生菜地上部砷含量尽管有一定差异,且其获得的不同品种生菜对砷吸收能力的顺序与其他方法基本一致,但相互间差异不显著。5 个生菜品种中紫罗马生菜对砷吸收的能力最弱,在轻微和中度砷污染土壤中地上部砷含量分别为 $0.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,仅为其他品种生菜的 49.8%~72.4%,各品种生菜砷吸收能力的大小排列顺序为耐抽薹生菜>绿萝>美国大速生>罗沙绿>紫罗马。综合本研究结果,旺盛生长期水培可以作为砷低吸收生菜筛选的优选方法。

关键词:砷;水培法;生菜;低吸收

中图分类号:X171.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2018)04-0632-08 **doi:**10.11654/jaes.2017-1484

Comparison of three types of hydroponics methods in screening for low arsenic uptake lettuces

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

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

Abstract: In order to accurately and efficiently compare the low arsenic uptake capabilities of vegetables and to build up appropriate screening methods, the As uptake capabilities of five lettuce (*var. ramosa* Hort.) varieties were studied by using three hydroponics methods: vigorous growth period, whole growth period, and short-term stress uptake. Pot experiments were conducted as the reference method to verify the feasibility of the tested hydroponics methods. The results indicated that the As uptake capacities of the five lettuce varieties via the vigorous growth and whole growth period methods were basically identical with the results of the pot experiments. The variation of As content in the aboveground biomass of the five lettuce varieties between the vigorous growth period and the whole growth period methods showed no difference. However, no significant differences in arsenic content between lettuce varieties were observed in the short-term stress absorption method. The As concentration in the aboveground biomass of the Ziluoma lettuce was the lowest among all varieties, at $0.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $0.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in the slight and middle As-contaminated soils, respectively. The capacities of As uptake from high to low were in the order: Naichoutai, Lvluo, Meiguodasusheng, Luoshaly, and Ziluoma. The hydroponics method of vigorous growth can be used to screen low As uptake vegetables.

Keywords: arsenic; hydroponics; lettuce; low uptake

《全国土壤污染状况调查公报》显示,我国砷污染土壤中轻微至中度污染的样本数占污染土壤样本总数的 90%左右,在中度及以下砷污染农田中种植作

物,可能会导致农产品中砷含量超标,而种植砷低吸收作物可在一定程度上减少作物对砷的吸收,降低农产品中砷超标的风险,是一种较经济、环保的土壤砷

收稿日期:2017-09-22 录用日期:2018-01-26

作者简介:张 骞(1990—),男,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

基金项目:国家自然科学基金项目(41541007)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41541007)

污染应对策略^[1-3]。近年来,砷等重金属低吸收作物越来越受到研究者的重视,很多研究已证明不同类型作物或品种之间砷吸收能力差异较大并能稳定遗传,Norton 等^[4]对 76 个水稻品种砷吸收能力的研究显示,两个不同土壤砷浓度地区种植的 76 个水稻品种谷粒中砷含量有显著相关性($r=0.802$),其中热带梗稻谷粒中砷含量最低,可作为砷低吸收水稻品种重点培育。

目前常用的砷低吸收作物筛选方法有土培法、调查取样法、水培法等^[5-7]。土培法一般采集污染土壤进行盆栽试验,或在污染区布置田间小区试验进行比较,通过不同作物可食部分砷含量的高低来筛选砷低吸收作物,且筛选结果准确,是一种最常用的方法,但存在工作量大、效率低等问题。调查取样法综合分析砷污染地区土壤和作物中砷含量的高低,判断不同作物砷吸收能力的大小,该方法可一次性调查多种作物,但准确性较差。除此之外,一些研究也证明可通过与砷吸收能力相关的根系渗氧能力、磷或硅含量等指标筛选砷低吸收作物。吴川等^[8]研究表明水稻根系渗氧能力与砷吸收能力有显著相关性,渗氧能力越强砷吸收量越少,并提出可通过筛选渗氧能力强的水稻品种减少砷吸收。亦有研究表明作物磷、硅等元素含量与砷含量之间存在显著正相关或负相关关系,通过磷、硅含量可间接判断作物对砷的吸收能力,采用这种方法可减少砷污染并能提高筛选效率,但因相关研究较少,其结论的准确性和普适性还有待进一步验证^[9-10]。水培方法以其快速、操作简单等优点而受到许多研究者的重视,但由于水培环境与土培环境差异较大,一些学者对水培方法筛选砷低吸收作物也提出了质疑。Cox 等^[11]研究发现油菜在水培和土培中对砷的耐性并不相同,营养液中磷含量过高可能会影响油菜对砷的吸收,而且传统水培方法也存在污染环境、效率较低等问题,因此其准确性仍需进一步验证,筛选效率也有待进一步提高。本研究以土培法作为基准方法,比较研究了 3 种不同水培方法与土培方法下 5 个生菜品种对砷吸收能力的差异,希望为砷低吸收

作物的筛选提供更加准确、高效的筛选方法。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验选取当前种植较普遍的冬春季代表性蔬菜——生菜作为研究对象,共 5 个品种,分别为罗莎绿、紫罗马、绿萝、美国大速生和耐抽薹生菜(依次记为 I-1、I-2、I-3、I-4、I-5)。为更好地模拟生菜在自然砷污染农田中的生长状况,土培实验用土采自湖南石门雄黄矿区周边砷污染农田的耕层(0~20 cm)土壤,根据其距离矿区的远近,分别采集了总砷含量分别为 $58.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $130.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (分别记为 S1、S2)的两种土壤,采用《全国土壤污染状况调查公报》中土壤污染等级的划分方法,S1 和 S2 分别为砷轻微和中度污染土壤,两种土壤的成土母质均为板页岩,其相关理化性质如表 1。水培实验营养液根据华南农业大学叶类蔬菜专用营养液 A 配方配制并略加改进^[12],为减小操作误差,相同处理营养液统一配制,所需外源砷采用稀释浓缩液($\text{Na}_3\text{AsO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 分析纯配制, $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)的方法添加,并用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ H}_2\text{SO}_4$ 和 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaOH}$ 调节营养液 pH 为 6.8(该营养液允许 pH 值为 6.4~7.2)。

1.2 试验方法

育苗:挑选粒大饱满各品种生菜种子约 150 粒浸泡于 10% H_2O_2 中约 20 min 进行消毒杀菌,再用去离子水清洗 3 遍约 5 min,然后将种子撒播于纯蛭石育苗盘中,每天根据耗水情况添加适量自来水使蛭石保持湿润。在人工气候箱中进行育苗,培养条件:温度控制为 $20^\circ\text{C}/18^\circ\text{C}$ (昼/夜),光照周期为 14 h/黑暗 10 h,相对湿度为 60%。待生菜长出 2 片真叶后挑选长势基本一致的幼苗进行移栽定植。定植后将蔬菜移至日光温室内进行后续试验。

土培试验:两种砷含量差异较大的土壤风干后过 2 mm 筛,装于内径和高分别为 80 mm 和 100 mm 的聚乙烯盆中,每盆装土 1 kg。试验前以溶液的形式施入 NH_4Cl 、 KH_2PO_4 、 K_2SO_4 作为底肥(施入量为 $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5$:

表 1 培养液及两种土壤主要元素含量和理化性质

Table 1 The main elements and physical and chemical properties of culture solution and two kinds of soil

培养介质	氮/碱解氮	磷/有效磷	钾/有效钾	总砷	有效砷	pH
营养液	112	22.94	184.86	0.2、4	—	6.4~7.2
S1	111.5	21.6	69.1	58.4	0.93	4.89
S2	106.2	28.1	121.0	130.6	2.94	5.22

注:营养液中各元素含量单位为 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,土壤中为 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

$K_2O=0.15:0.18:0.12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土),并使土壤含水量达到最大田间持水量的60%左右,土水稳定平衡一周后选取长势基本一致的幼苗移栽定植,每盆定植6株幼苗,7 d后根据生长情况间苗3株,每个处理重复3次。每天根据土壤耗水情况添加20~50 mL自来水,生长35 d后分别收获地上部和根系。

旺盛生长期/全生育期水培试验:幼苗首先定植于装有2 L全浓度营养液的水培箱中,每个水培箱定植4株幼苗,适应生长7 d后进行加砷处理,共设置0、2、4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 3种砷浓度处理(以下分别简称CK、处理1、处理2),每个处理重复3次,每隔7 d更换一次含砷营养液,旺盛生长期和全生育期试验分别在加砷处理2周和4周后收获地上部和根系。

短期胁迫培养试验:幼苗定植于装有2 L全浓度营养液水培箱中生长20 d,期间每隔7 d更换一次营养液,20 d后将植株转移至含砷营养液中生长2 d,共设置0、2、4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 3种砷浓度处理,2 d后分别收获地上部和根系,每个处理重复3次。

样品收获后的处理及总砷测定见参考文献[9]。

1.3 数据处理

试验数据通过Excel 2013整理后,采用SPSS 19.0进行单因素方差分析,并用Tukey's HSD法进行多重比较。显著性差异水平取0.05。

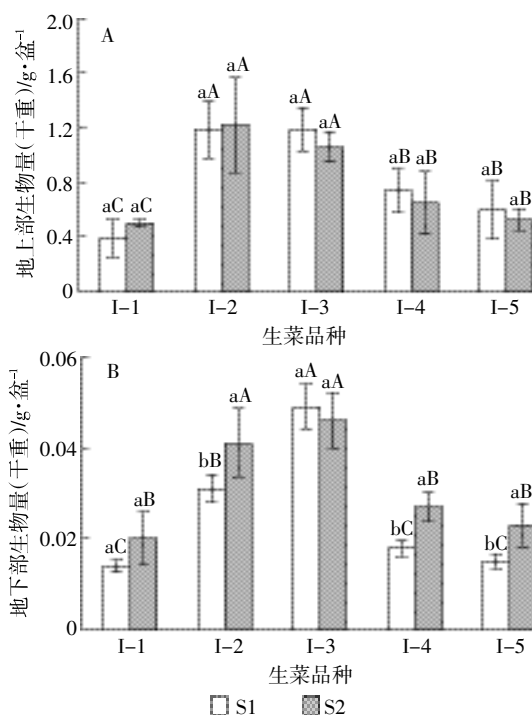
2 结果与分析

2.1 土壤砷含量对不同品种生菜砷吸收的影响

2.1.1 土壤砷含量对不同品种生菜生长的影响

图1为不同品种生菜在两种砷含量土壤中地上部和地下部生物量示意图。

从图1可以看出:在同一砷含量的土壤中,不同品种生菜地上部和地下部生物量有显著差异,其中地上部生物量以品种I-2和I-3最高,其次为I-4和I-5,而I-1则最小;地下部生物量与地上部生物量有较好对应关系,亦以I-2和I-3最高,约为其他品种的1.7~3.5倍。而在砷含量不同的两种土壤中,5个品种生菜地上部生物量(干重)间没有显著差异,且实际生长过程中S1和S2两种土壤中生菜均能正常生长,没有出现任何砷中毒症状,该结果似乎意味着生菜对土壤砷污染具有较强的耐性。但是,生菜地下部生物量受砷的影响则较为明显,品种I-2、I-4和I-5在S2土壤中地下部生物量相比于S1显著增加,增加量分别为32.2%、50.0%和53.3%,I-1和I-3则差异不显著。根据本研究结果,土壤砷含量对生菜地下部生长



不同小写字母表示两种砷含量土壤间差异显著,不同大写字母表示不同品种间差异显著($P<0.05$)

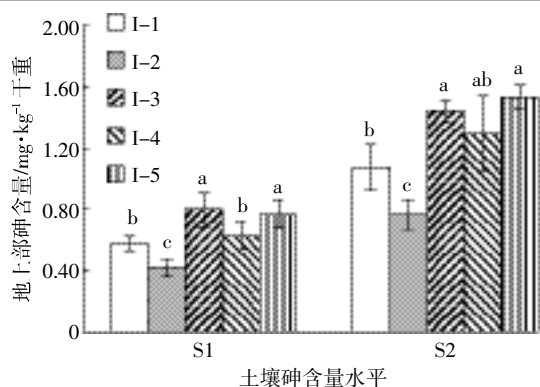
图1 土壤砷含量对生菜地上部(A)和地下部(B)生物量的影响

Figure 1 The effect of soil As contents on the dry weight of aboveground(A) and underground(B) parts of different vegetable species

的影响更为明显,因此,仅通过地上部生物量的变化来反映生菜受砷污染的影响是不全面的。

2.1.2 土壤砷含量对不同品种生菜砷含量的影响

从图2可以看出,不同品种生菜地上部砷含量无论在何种砷污染土壤中种植时均有显著差异。品种I-2在两种砷含量土壤中地上部砷含量均最低,分别约为 $0.42\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.77\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;其次为品种I-1和I-4,地上部砷含量分别约为 0.58 、 $1.18\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 0.63 、 $1.30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。同时,在S1土壤中,品种I-3地上部砷含量最高,但与品种I-5差异不显著;在S2土壤中品种I-5地上部砷含量最高,约为 $1.53\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,但与品种I-3的差异亦较小。随着土壤砷含量的升高,5种生菜地上部砷含量均显著增加,S2土壤中5个生菜品种地上部平均砷含量达 $1.22\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,是S1土壤中的1.9倍。在S1和S2两种砷含量的土壤中,5个生菜品种地上部砷含量比较的顺序基本一致,表现为 $I-5\approx I-3>I-4\approx I-1>I-2$ 。两种砷含量土壤中,品种I-2地上部砷含量均显著低于其他品种生菜,仅为其他品种的49.8%~72.4%。



不同字母表示相同处理不同品种间差异显著 ($P < 0.05$)

图2 土壤砷含量对不同品种生菜地上部砷含量的影响

Figure 2 The effect of soil As contents on the As uptake by the aboveground of different lettuce species

进一步对生菜地下部砷含量及相关指标进行分析(表2)可以看出,生菜地下部砷含量在 $110.55 \sim 810.84 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,远大于地上部砷含量。不同品种生菜之间地下部砷含量差异显著,地上部砷含量最小的品种 I-2 在两种砷含量土壤中地下部的砷含量也最低,分别为 $110.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $435.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而品种 I-4 地下部砷含量最高达 $302.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $810.84 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,是其他品种的 1.14~1.86 倍,生菜地下部砷含量大小顺序为 $\text{I-4} > \text{I-5} > \text{I-3} > \text{I-1} > \text{I-2}$ 。转移系数是指地上部砷含量与地下部砷含量的比值,表示砷从地下部向地上部的转运能力,根据前述结果计算的本试验不同品种生菜对砷的转移系数显示,品种 I-4 在两种砷含量土壤中的转移系数均为最小,I-3 的转移系数最大,S2 土壤中所有品种生菜的转移系数均小于 S1 土壤中,说明当土壤砷含量升高时,生菜由地下部向地上部迁移砷的比例可能会降低,从而减少砷在生菜地上部的累积。富集系数是指生菜地上部砷含量与土壤中砷含量的比值,该指标可直观反映出不同品种对砷吸收能力的大小,从表2结果看,S2 土壤中生菜

富集系数均低于 S1 土壤,说明随土壤砷含量的增加,生菜富集砷的能力有所下降;但同时,不同品种间比较,I-2 品种对砷的富集系数明显较低,而 I-3 和 I-5 则明显较高。

2.2 旺盛生长期和全生育期水培下不同品种生菜的生长及对砷的吸收

2.2.1 两种水培方式对生菜生长的影响

从图3可以看出:旺盛生长期水培试验中,生菜品种 I-1、I-2 和 I-4 地上部生物量随营养液砷浓度的增加而增加,当营养液砷浓度为 $2, 4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,品种 I-1、I-2 和 I-4 地上部生物量(干重)较 CK 分别增加了 62.5%、50.6%、40.9%和 75%、108.9%、43.6%;但是,品种 I-3 地上部生物量相比于 CK 则显著降低,分别降低了 32.9%和 21.9%。两种砷浓度处理下,品种 I-1、I-2、I-3 和 I-4 地下部生物量变化趋势与地上部基本一致,但是当营养液砷浓度为 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,品种 I-5 地下部生物量较 CK 增长了约 27.7%,与地上部生物量的变化不一致。结果表明:在旺盛生长期培养条件下,培养液砷浓度相对较低时对大多数品种生菜的生长可能具有一定的促进作用。

图4为全生育期水培下不同营养液砷浓度对生菜地上部和地下部生长的影响。可以看出,生菜经全生育期水培后地上部和地下部生物量均较旺盛生长期培养有显著增加,5个生菜品种地上部和地下部生物量随营养液砷浓度的变化与旺盛生长期培养基本一致。砷对品种 I-1、I-2 和 I-4 地上部的生长主要起促进作用,对品种 I-5 地上部的生长影响不显著。略有不同的是当营养液砷浓度为 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,品种 I-3 地上部和地下部生物量与 CK 没有显著性差异。通过以上分析可以得出,水培试验条件下生菜品种 I-1、I-2 和 I-4 对砷的耐性较强,品种 I-5 次之,I-3 对砷的耐性最差。另外,砷对生菜地上部和地下部生长的促进

表2 土壤砷含量对不同品种生菜地下部砷含量、转移系数及富集系数的影响

Table 2 The effect of soil As contents on the root As uptake, As translocation factors and bioconcentration factors of different lettuce species

生菜品种	地下部砷含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$		转移系数/ $\times 10^{-3}$		富集系数/ $\times 10^{-3}$	
	S1	S2	S1	S2	S1	S2
I-1	156.94 ± 20.36^b	436.37 ± 43.63^d	3.70	2.69	9.9	8.2
I-2	110.55 ± 16.77^c	435.70 ± 35.26^d	3.80	2.21	7.2	5.9
I-3	167.62 ± 44.17^b	527.93 ± 47.56^c	4.77	2.74	13.7	11.1
I-4	302.57 ± 40.84^a	810.84 ± 35.37^a	2.08	1.60	10.8	9.9
I-5	265.95 ± 28.26^a	653.99 ± 23.14^b	2.90	2.35	13.2	11.8
平均值 AG	200.73	572.97	3.45	2.32	11.0	9.4

注:表中不同字母表示相同处理不同品种间差异显著 ($P < 0.05$)。

或抑制作用并不随时间和生物量变化而变化,旺盛生长期和全生育期培养下,生菜地上部和地下部生物量随砷浓度的变化趋势是基本一致的。

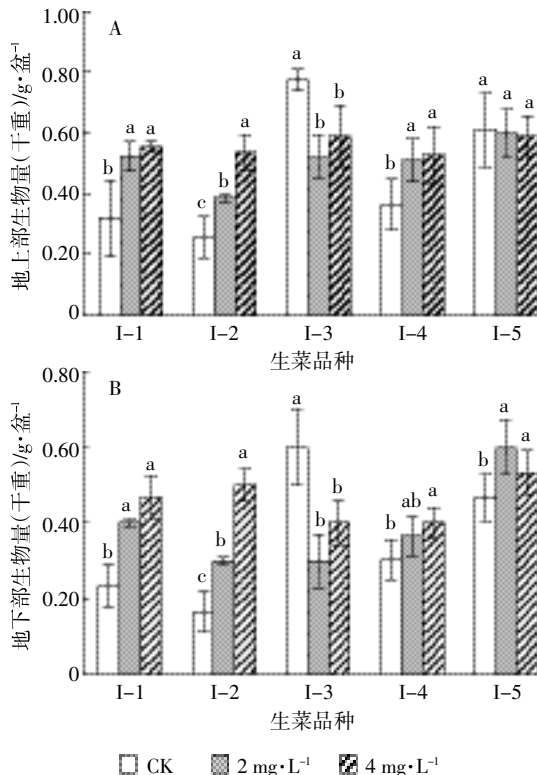
2.2.2 两种水培方式对生菜砷吸收的影响

水培环境与土培环境差异较大,水培条件下作物对元素的吸收利用可能与土培条件有所不同。表3为旺盛生长期和全生育期水培下不同品种生菜地上部的砷含量。

从表中结果看,旺盛生长期水培下,当营养液砷浓度为 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,品种 I-2 地上部砷含量最低,约为 $7.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;品种 I-1、I-3 和 I-4 之间地上部砷含量较高,但相互间差异不显著,分别为 11.00 、 $12.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $13.44 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;品种 I-5 地上部砷含量最高约为品种 I-2 的 2.2 倍。当营养液砷浓度为 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,5 种生菜地上部砷含量均显著增加,平均值为 $23.93 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,约是营养液砷浓度为 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时的 1.9 倍,其中,品种 I-2 地上部砷含量最低为 $16.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,比营养液砷浓度为 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时增加了 113.3%;品种 I-1 和 I-4 地上部砷含量差异不显著,

分别约为 $20.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $23.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。根据相关结果推断,5 种生菜砷吸收能力大致为 $\text{I-5} > \text{I-3} > \text{I-4} \approx \text{I-1} > \text{I-2}$ 。各品种生菜经全生育期水培后,地上部砷含量与旺盛生长期培养基本一致,两种砷浓度处理下,品种 I-2 和 I-5 分别是地上部砷含量最低和最高的品种,当营养液砷浓度为 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,地上部砷含量分别约为 $7.98 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $16.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,当营养液浓度为 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,两种生菜地上部砷含量较营养液浓度为 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时分别增长了 85.4% 和 65.7%,增长幅度均小于旺盛生长期水培试验。总体而言,旺盛生长期和全生育期水培下,5 个生菜品种地上部砷含量大小顺序为 $\text{I-5} > \text{I-3} > \text{I-4} \approx \text{I-1} > \text{I-2}$,与土培试验结果基本一致。

进一步分析旺盛生长期和全生育期水培结果可以得出,多数情况下旺盛生长期和全生育期水培对生菜地上部砷含量没有显著影响,仅品种 I-1 和 I-5 地上部砷含量在营养液砷浓度为 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时差异显著,全生育期水培下地上部砷含量显著小于旺盛生长期水培,差值分别为 $4.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $5.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,说明



不同字母表示同一品种不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。图 4 同

图 3 旺盛生长期水培下砷浓度对不同品种生菜地上部(A)和地下部(B)生长的影响

Figure 3 The dry weight of aboveground(A) and underground(B) parts of five lettuce species exposed to different concentration of As in the vigorous growth period hydroponic

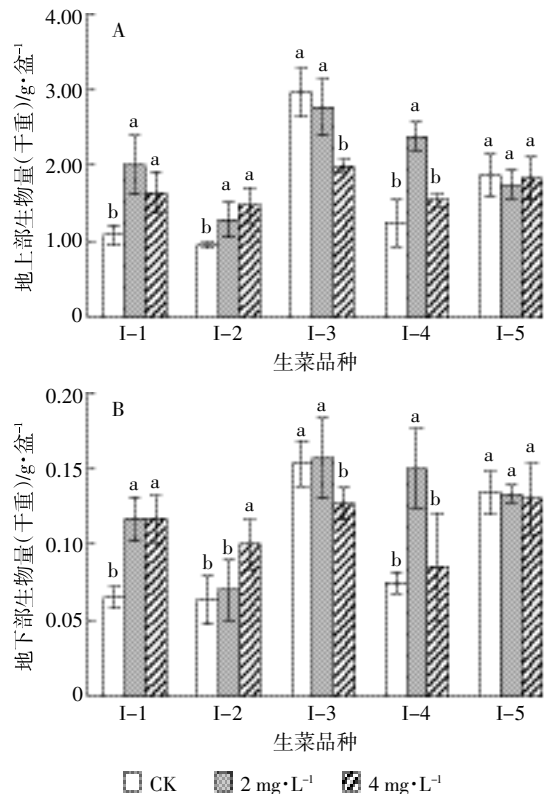


图 4 全生育期水培下砷浓度对不同品种生菜地上部(A)和地下部(B)生长的影响

Figure 4 The dry weight of aboveground(A) and underground(B) parts of five lettuce species exposed to different concentration of As in the whole growth period hydroponic

表 3 旺盛生长期和全生育期水培下不同品种生菜地上部砷含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 3 The As contents in the aboveground parts of lettuces in the vigorous growth period and whole growth period hydroponic($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

生菜品种	旺盛生长期			全生育期		
	CK	$2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	CK	$2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$
I-1	0.27	$11.00\pm 0.48\text{bA}$	$20.80\pm 3.99\text{bA}$	0.20	$11.68\pm 1.52\text{bA}$	$16.28\pm 2.91\text{cB}$
I-2	0.24	$7.58\pm 2.68\text{cA}$	$16.17\pm 3.10\text{cA}$	0.14	$7.98\pm 2.21\text{cA}$	$14.81\pm 3.18\text{cA}$
I-3	0.27	$12.34\pm 0.82\text{bA}$	$27.47\pm 4.00\text{aA}$	0.14	$12.85\pm 0.83\text{bA}$	$25.15\pm 1.22\text{aA}$
I-4	0.22	$13.44\pm 2.35\text{bA}$	$23.31\pm 3.41\text{bA}$	0.23	$10.78\pm 3.04\text{bcA}$	$22.20\pm 2.36\text{bA}$
I-5	0.32	$17.22\pm 2.87\text{aA}$	$31.90\pm 3.82\text{aA}$	0.15	$16.00\pm 1.56\text{aA}$	$26.50\pm 1.29\text{aB}$

注:表中不同小写字母表示相同处理不同品种间差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示同一品种生菜、相同砷浓度处理,不同生长期差异显著($P<0.05$)。

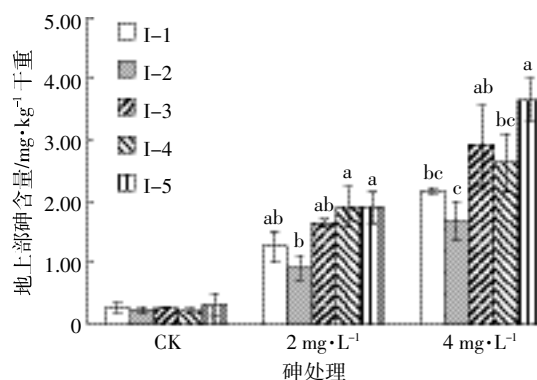
生菜各品种地上部砷含量在旺盛生长期之后可能不再随时间和地上部生物量的变化而变化,而是维持在一个相对稳定的水平,生菜地上部砷含量可能在生长早期就达到稳定状态,此后随时间的变化较小。因此,通过旺盛生长期水培即可初步判断出不同品种生菜砷吸收能力的大小,并能预测成熟期生菜地上部的砷含量。

2.3 短期胁迫水培下不同品种生菜对砷的吸收

从图 5 可以看出,在不含砷的营养液中培养至旺盛生长期(20 d)的生菜,再在含砷营养液中胁迫吸收砷 2 d 后,地上部砷含量较 CK 有显著增加。当营养液砷浓度为 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,各品种生菜地上部砷含量平均为 $1.69\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中品种 I-4 和 I-5 最高,约为 $1.90\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,品种 I-2 含量最低,约为 $1.33\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;5 个生菜品种之间地上部砷含量差异较小,最高值仅为最低值的 1.4 倍。当营养液砷浓度为 $4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,生菜各品种地上部砷含量较营养液砷浓度为 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时显著增加,平均值为 $2.67\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中品种 I-5 地上部砷含量为 $3.67\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 显著高于品种 I-1、I-2、I-4,品种 I-2 仍保持较低的砷吸收能力,但与品种 I-1 和 I-4 之间的差异不显著。

2.4 几种培养方法对生菜吸收砷能力的比较

从表 4 可以看出,旺盛生长期和全生育期水培法得出的不同品种生菜砷吸收能力与土培法是基本一致的,但短期胁迫培养法尽管不同生菜吸收能力的顺序与前述 3 种方法大致相同,但因不同品种生菜地上部砷含量差异较小,实际上用来判断是否属于低吸收品种尚有一定难度。4 种方法比较,旺盛生长期和短期胁迫培养法用时相对较短,并且有可能进一步通过试验设计缩短培养时间,因此这两种方法在效率上有较大优势。综合本研究中试验用时间及准确性两方面考虑,旺盛生长期水培方法是一种较理想的筛选方法。当然,尽管本研究中短期胁迫培养法在准确性上



不同字母表示相同处理不同品种间差异显著($P<0.05$)

图 5 短期胁迫水培下不同品种生菜地上部砷含量

Figure 5 The As contents in the aboveground parts of lettuces in the short-term stress uptake hydroponic

有一定不足,但该方法在环保和操作性上较另外两种水培方法有较大的优势,如果通过改变培养液浓度或适当延长培养时间等措施,使不同品种间的砷吸收达到显著差异(或差距更大),作为一种创新性的筛选方法仍是值得进一步研究和探索的。

3 讨论

砷被世界卫生组织列为一类致癌物,也是我国环境污染治理中优先考虑的污染物之一,一般认为低剂量的砷可促进作物生长,高剂量的砷对作物生长有害并能抑制其生长^[13-14]。土培试验结果显示,当土壤中砷含量达 $113\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时 5 种生菜仍能正常生长,地上部生物量与轻微砷污染($58.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)土壤处理并没有显著差异,但对生菜地下部生长的影响较明显,品种 I-2、I-4 和 I-5 在砷含量高的土壤中地下部生物量较在含量较低土壤中有显著增加,即促进了生菜地下部生长,说明砷对生菜地下部生长的影响大于地上部。Kapustka 等^[15]的研究表明,作物不同生理变量对砷敏感性强弱顺序为根长>根生物量>茎叶长度>茎叶生物量>发芽率,与本研究结果相一致。水培条件下

表4 几种培养方法下生菜不同品种对砷吸收的比较

Table 4 Comparison of the As uptake capabilities of five lettuce species from the different screening methods

方法	不同生菜品种砷吸收能力	用时/d	含砷营养液更换次数
土培法	I-5≈I-3>I-4>I-1>I-2	45	0
旺盛生长期水培法	I-5>I-3>I-4≈I-1>I-2	31	2
全生育期水培法	I-5>I-3>I-4≈I-1>I-2	45	4
短期胁迫培养法	I-5≈I-3>I-4≈I-1>I-2	32	1(可循环使用)

砷对生菜地上部和地下部生长的影响均较明显,当营养液砷浓度分别为 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,砷对生菜品种 I-1、I-2 和 I-4 地上部的生长主要起促进作用,其生物量显著高于 CK;而品种 I-3 和 I-5 地上部、地下部生物量相比于 CK 则显著减少或保持不变,表明不同品种生菜对砷的耐性不同。本次土培试验用土取自仍在进行农业生产的自然砷污染农田,试验结果也表明这两种土壤上种植的生菜仍能正常生长,砷对生菜生长的抑制作用较小,蔡保松等^[6]和肖细元等^[16]对我国石门、郴州等砷污染区的调查发现,在土壤砷含量超过国家土壤质量标准十几倍的地区作物仍能正常生长。作物能在砷污染农田中正常生长,通常使人们忽视收获物中砷超标对人类健康的潜在威胁,这也是我们筛选低吸收砷作物的重要原因之一。就本研究的土培试验结果而言,砷吸收能力较弱的生菜品种 I-2 地上部砷含量为其他品种的 49.8%~72.4%,相比于其他品种生菜,食用 I-2 时最多可减少 50% 砷的摄入。因此,在中轻度砷污染农田中种植砷吸收能力较低的作物意义十分重大。

水培方法是一种成熟的作物培养方法,由于其具有操作简单、作物生长快、条件容易控制等优点,目前不仅应用于相关研究中,也在现代设施农业中得到了广泛应用。通过水培方法研究作物对砷的吸收能力,近年来受到了一些研究者的重视,如 Zhang 等^[17]采用水培方法研究了不同品种水稻苗期对砷吸收的差异,生长 32 d 的水稻幼苗在含砷营养液中处理 6 d 后收获,结果表明不同品种水稻地上部砷含量有显著差异,其中以“94.11”和“JX17”的含量最低,仅为品种“ZYQ8”的 50% 左右;Mathieu 等^[7]通过全生育期水培方法(35 d)研究了 5 种叶类蔬菜对砷的吸收能力,结果表明不同类型蔬菜的砷吸收能力有较大差异,具体为空心菜>芹菜>苋菜>生菜>莴苣。通过前人的研究我们发现,采用水培方法筛选砷低吸收作物没有统一的标准,培养时间从几天到几十天不等^[18-20]。本研究比较了不同培养方法下生菜地上部和地下部的砷含量,结果表明不同培养方法对几种生菜砷吸收能力的影

响不大,旺盛生长期和全生育期水培试验确定的不同品种生菜砷吸收能力强弱与土培试验结果基本一致,5 种生菜砷吸收能力大小为 $I-5>I-3>I-4>I-1>I-2$,且多数情况下旺盛生长期和全生育期生菜地上部砷含量没有显著差异,说明生菜经旺盛生长期培养后地上部砷含量基本上不再随时间和生物量的变化而变化。Lombi 等^[21]研究发现,水稻分蘖期至开花期(38~56 d)第 1、2、3 片叶中砷含量基本保持不变且均维持在较低水平,颖壳中的砷在花期以后至成熟期(62~85 d)也基本保持稳定,其结果与本试验的结果具有一致性。生菜生育期较短(40 d 左右),一般在营养生长(Vegetative growth)阶段就能收获,根据试验结果得出生菜地上部砷含量在旺盛生长期后不再随培养时间的延长而增加,即可通过旺盛生长期水培的结果判断生菜后期地上部砷含量以及不同品种生菜对砷的吸收能力。同时,根据本研究结果可以认为,旺盛生长期水培法在筛选效率、准确性等方面具有较大优势,可作为砷低吸收生菜(乃至叶类作物)品种筛选的优选方法。

4 结论

(1)土培试验下轻微和中度砷污染土壤中,5 种生菜地上部生物量没有显著差异;品种 I-2、I-4、I-5 在中度砷污染土壤中地下部生物量较轻微砷污染土壤中显著增加,分别增长了 32.2%、50.0%和 53.3%,土培条件下砷对生菜地下部生长的影响大于地上部。

(2)旺盛生长期和全生育期水培条件下,品种 I-1、I-2 和 I-4 对砷的耐性较强,地上部生物量较 CK 显著增加,品种 I-3 地上部生物量较 CK 显著降低,I-5 则基本保持不变。

(3)土培试验两种不同砷含量的土壤中,品种 I-2 生菜地上部砷含量最低分别约为 $0.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,仅为其他品种的 49.8%~72.4%,可以认为是砷低吸收作物,各品种生菜地上部砷含量由高到低的顺序排列为 $I-5 \approx I-3>I-4>I-1>I-2$ 。

(4)旺盛生长期水培法在筛选效率、准确性等方

面优于其他两种水培方法,可作为砷低吸收生菜品种筛选的优选方法。

参考文献:

- [1] 环境保护部,国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[EB/OL].[2014-04-17]. 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/OL].[2014-04-17]. http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm
- [2] 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.
- [3] 刘维涛,周启星.重金属污染预防品种的筛选与培育[J].生态环境学报,2010,19(6):1452-1458.
LIU Wei-tao, ZHOU Qi-xing. Selection and breeding of heavy metal pollution-safe cultivars[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(6):1452-1458.
- [4] Norton G J, Islam M R, Deacon C M, et al. Identification of low inorganic and total grain arsenic rice cultivars from Bangladesh[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(15):6070-6075.
- [5] 竺朝娜,冯英,胡桂仙,等.水稻糙米砷含量及其与土壤砷含量的关系[J].核农学报,2010,24(2):355-359.
ZHU Chao-na, FENG Ying, HU Gui-xian, et al. Arsenic concentration of brown rice and its relationship with soil arsenic[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2010, 24(2):355-359.
- [6] 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 Hunan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(4):711-717.
- [7] Mathieu N K, 曾希柏,李莲芳,等.几种叶类蔬菜对砷吸收及吸收特性的比较研究[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.
- [8] 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.
- [9] 张骞,曾希柏,苏世鸣,等.不同品种莴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. The effect of amaranth species on the uptake of arsenic and the interaction of arsenic and phosphate in amaranths[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(10):1888-1894.
- [10] Norton G J, Islam M R, Duan G, et al. Arsenic shoot-grain relationships in field grown rice cultivars[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(4):1471-1477.
- [11] Cox M S, Bell P F, Kovar J L. Differential tolerance of canola to arsenic when grown hydroponically or in soil[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1996, 19(12):1599-1610.
- [12] 郭世荣.无土栽培学[M].北京:中国农业出版社,2003.
GUO Shi-rong. Soilless culture[M]. Beijing:China Agricultural Press, 2003.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Kapustka L A, Lipton J, Galbraith H, et al. Metal and arsenic impacts to soils, vegetation communities and wildlife habitat in Southwest Montana uplands contaminated by smelter emissions: II. Laboratory phytotoxicity studies[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1995, 14(11):1905-1912.
- [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] 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.
- [18] 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.
- [19] Wu C, Ye Z H, Shu W S, et al. Arsenic accumulation and speciation in rice are affected by root aeration and variation of genotypes[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62(8):2889-2898.
- [20] Li R Y, Stroud J L, Ma J F, et al. Mitigation of arsenic accumulation in rice with water management and silicon fertilization[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(10):3778-3783.
- [21] Lombi E, Scheckel K G, Pallon J, et al. Speciation and distribution of arsenic and localization of nutrients in rice grains[J]. *New Phytologist*, 2009, 184(1):193-201.