

几种叶类蔬菜对砷吸收及累积特性的比较研究

N. K. Mathieu, 曾希柏*, 李莲芳, 苏世鸣, 王秀荣, 冯秋分, 白玲玉, 王亚男, 段然, 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:运用水培试验方法,比较了5种叶类作物对砷的吸收特性。结果表明,当营养液中砷浓度为2、4、8 mg·L⁻¹时,芹菜(*Apium graveolens* L.)、苋菜(*Amaranthus mangostanus* L.)和空心菜(*Ipomea aquatica* L.)地上部分生物量均显著降低($P<0.05$),而莴苣(*Lactuce sativa* var. *longifolia*)和生菜(*Lactuce sativa* L.)的地上部生物量与CK相比差异不显著,表现出相对更高的耐受性;从不同叶类蔬菜对砷的累积来看,在培养液砷浓度为10 mg·kg⁻¹时,空心菜地上部分对砷的累积量最高、达1623 μg·pot⁻¹,莴苣最低、为45.58 μg·pot⁻¹,5种叶类蔬菜累积量大小顺序为:空心菜>芹菜>苋菜>生菜>莴苣。不同砷浓度培养液下,莴苣和生菜对砷的转移系数均值分别为0.02和0.03,富集系数均值分别为2.75和2.66,低于其他蔬菜。该研究结果为应用水培方法快速初步筛选砷低吸收作物提供了依据。

关键词:叶类蔬菜;砷;水培试验;累积;转移与富集系数

中图分类号:X503.231 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)03-0485-06 doi:10.11654/jaes.2013.03.012

A Screening Study of Five Leafy Vegetable Species for Tolerance and Accumulation of Toxic Inorganic Arsenic(V) Under Hydroponic Conditions

N K Mathieu, ZENG Xi-bai*, LI Lian-fang, SU Shi-ming, WANG Xiu-rong, FENG Qiu-fen, BAI Ling-yu, WANG Ya-nan, DUAN Ran, WU Cui-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, P.R. China)

Abstract: A hydroponic experiment under greenhouse condition with five leafy vegetable species including romaine (*Lactuce sativa* var. *longifolia*), lettuce (*Lactuce sativa* L.), Celery (*Apium graveolens* L.), amaranth (*Amaranthus mangostanus* L.) and water spinach (*Ipomea aquatica* L.) was conducted to compare the properties of arsenic(As) uptake in As contaminated farmland. The results showed that the shoot biomass(FW) of celery, amaranth, and water spinach was significantly ($P<0.05$) lower, when the As concentration in the nutrient solution was with 2, 4, and 8 mg·L⁻¹, while As addition did not have significant effects on the shoot biomass of romaine and lettuce under all the As treatments used compared to the control. It indicated that romaine and lettuce had higher As tolerance. When the arsenic in nutrient solution reached up to 10 mg·L⁻¹, water spinach had the highest shoot As accumulation with 1623 μg·pot⁻¹ and lettuce had the lowest shoot As accumulation with 45.58 μg·pot⁻¹. As accumulation in shoot of five species was ranked from high to low in the order of spinach, celery, amaranth, lettuce and romaine. Under the different As concentrations in the nutrient solution, the translocation factor(TFs) for lettuce and romaine is with 0.02 and 0.03 respectively, while the BFs(ratio between As concentration in shoot and As in nutrient) for lettuce and romaine is with 2.75 and 2.66 respectively. Both of TFs and BFs in lettuce and romaine is lower than in other vegetables. The results could provide an effective basis for screening of low As uptake crops under hydroponic experiments.

Keywords: leafy vegetable; arsenic(V); hydroponic experiment; accumulation; translocation and bioaccumulation factor

收稿日期:2013-01-10

基金项目:国家自然科学基金(41001187);国家“十二五”科技支撑计划(2012BAD14B02)

作者简介:N. K. Mathieu, 刚果民主共和国人, 硕士研究生, 主要从事农业环境演变与调控研究。

* 通信作者:曾希柏 E-mail:zengxibai@caas.cn

在过去 20 余年来,随着工业和采矿业快速发展,部分地区农田中砷累积甚至污染的事件呈现出增加趋势^[1-5],不仅对农田生态系统健康,而且也通过食物链传播对人体健康带来了一定的影响^[6-7]。因此,降低农田中砷的作物有效性、减少作物对砷的吸收量,促进农产品安全生产,已成为当前乃至今后一段时间内的研究重点和热点。近年来,国内外在砷超富集植物筛选及吸收砷特征等研究方面,已筛选出多种砷超富集植物如蜈蚣草、大叶井口边草等,并就其吸收、富集、转化砷的特性等开展了一系列研究^[8-10],同时已开始将其用于砷污染土壤修复的研究;亦有研究者开始关注砷低吸收植物筛选和利用研究^[11-13],力图通过种植低吸收作物达到在砷超标农田中高产、高效、安全生产的目的。根据有关研究结果,人类通过蔬菜和谷物摄取的砷量超过总吸收量的 73%^[14],而且,与根茎类和茄类蔬菜、豆类作物及玉米相比,叶类蔬菜对砷的富集系数最高^[15],所以筛选对砷低吸收的叶类蔬菜意义重大。本文通过水培试验方法,比较了 5 种叶类蔬菜对砷吸收的差异,旨在系统探讨不同类型叶类蔬菜对砷吸收能力,从而为砷低吸收作物快速初步筛选提供方法参考。

1 材料与方法

1.1 水培试验

试验采用莴苣 (*Lactuca sativa* var. *longifolia*)、生菜 (*Lactuca sativa* L.)、芹菜 (*Apium graveolens* L.)、苋菜 (*Amaranthus mangostanus* L.) 和空心菜 (*Ipomea aquatica* L.) 5 种不同种类的叶类蔬菜,其种子均购自中国农业科学院蔬菜花卉研究所。水培条件下 5 种蔬菜种子的萌发和植株培养均在温室内进行,其条件控制为:35/22 ℃(昼/夜)、日光照 12 h,相对湿度 70%。5 种作物的种子经 30% H₂O₂ 浸泡消毒 15 min 后,用去离子水洗净,育苗期间不添加任何营养物质,只补充水分使其保持湿润,直到种子发芽并长至第三片真叶,再用 1/4~1/2 浓度的 Hoagland (Hoagland and Arnon, 1941) 营养液(用 NaOH/HCl 调节 pH 值 6.3)浇灌幼苗使其保持湿润 1 周。选取长势相近的幼苗,用去离子水将根系上附着的蛭石冲洗干净,并移栽至装有 1.5 L Hoagland 营养液的塑料瓶中,每个塑料瓶中移栽 4 株幼苗,每周更换一次营养液。

在营养液中添加不同量的五价砷 ($\text{Na}_3\text{AsO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) 使砷的浓度分别为 0、1、2、4、6、8、10 mg·L⁻¹ (编号为 CK、T1、T2、T3、T4、T5、T6)。各种砷浓度处理

下的水培试验均设置 4 个重复,每个塑料瓶中均移栽 4 株幼苗。每次更换营养液时,同时添加一定量的砷使其保持各处理的相应浓度。培养 35 d 后将地上部分和根系分开收获,并用去离子水冲洗干净、定量滤纸将水吸干后,分别测量各处理鲜重。将植株地上部分和根系分别装在入信封中,90 ℃杀青 1 h 后、70 ℃烘干至恒重。

1.2 植株样品的消解和测定

作物样品经烘干称重、剪碎、研磨,称取约 0.5 g 放入干净的消解管中,加入 5 mL 浓 HNO₃,放置过夜。至第二天,将消解管放入消解炉中,75 ℃下消解 5 h,然后将温度调节到 110 ℃继续消解 2 h,最后在 140 ℃下再消解 8 h。试验同时设置 3 个空白,并用 2 个标样(圆白菜 GBW10015 和 GBW10014,均购自中国计量科学院)作为参比。消解完成后,将溶液冷却并定容至 25 mL,过滤,用氢化物发生-原子荧光仪 (HG-AFS, 北京吉天仪器)测定滤液中的砷含量。

1.3 数据统计及相关指标计算

试验数据采用 SPSS 16.0 和 Sigma Plot 10.0 进行方差分析。同时,根据下述方法分别计算有关参数。

(1)转移系数(TF):为作物将重金属从植株地下部分转移到地上部分的能力^[16]。TF=地上部分重金属含量/根系重金属含量;

(2)耐性指数(TI):为作物在砷胁迫下的相对生长速率。TI=(砷胁迫下作物的根长/空白处理的作物根长)×100;

(3)生物富集系数(BF):为作物对某种元素的富集能力。BF=地上部分重金属含量/营养液的重金属含量。

2 结果与分析

2.1 培养液砷浓度对蔬菜生长的影响

从图 1 可以看出,培养液中砷浓度的变化在不同程度上影响叶类蔬菜的地上部干重,且不同种类蔬菜地上部生物量随砷浓度变化的表现不尽相同。当营养液中 As 浓度分别为 2、4、8 mg·L⁻¹ 时,芹菜、苋菜和空心菜地上部分生物量均显著降低($P<0.05$),当营养液中 As 浓度达到 10 mg·L⁻¹ 时,苋菜、芹菜和空心菜地上部分生物量分别为 10.72、4.22、9.75 g,与 CK 相比分别降低了约 11.0%、49.4%和 13.9%。另外,随着培养液中砷浓度的增大,莴苣和生菜的地上部干重与 CK 相比差异不显著。可以初步认为,相对于其他叶类蔬菜而言,莴苣和生菜对培养液中砷浓度的增加并不敏感,表现出较强的耐砷能力。

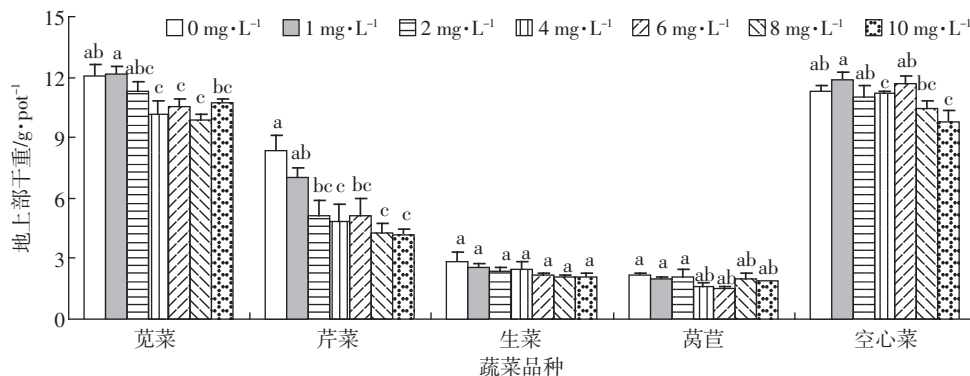


图 1 培养液砷浓度对 5 种蔬菜地上部干重的影响

Figure 1 The dry weights of aerial part of five vegetable species exposed to different concentration of As

为进一步明确 5 种不同叶类蔬菜对培养液中砷的耐性能力,根据相关结果计算了 5 种蔬菜对砷的耐性指数。从表 1 结果来看,茼蒿的耐性指数均较高,尤其是在 T2、T4、T5、T6 处理中,其耐性指数值均明显高于其他蔬菜。当培养液中砷浓度低于 $8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,生菜的耐性指数值明显高于除茼蒿之外的其他 3 种蔬菜。5 种叶类蔬菜耐性指数平均值比较,其顺序为:茼蒿>生菜>芹菜>莴菜>空心菜。该结果与不同叶类蔬菜地上部干重的变化结果具有很好的一致性。

表 1 5 种蔬菜对砷的耐性指数

Table 1 The tolerance index of five vegetable species exposed to different concentration of As

处理	耐性指数(TI)				
	莴菜	芹菜	生菜	茼蒿	空心菜
T1	90.03	89.10	96.97	91.06	81.24
T2	71.74	80.10	94.55	97.76	82.50
T3	67.80	80.10	86.67	83.11	80.07
T4	81.28	78.67	86.06	93.29	76.72
T5	79.00	66.83	76.36	84.72	63.32
T6	83.03	81.99	73.33	90.81	52.85

2.2 培养液砷浓度对蔬菜砷含量及累积量的影响

2.2.1 蔬菜中砷含量的变化

水培条件下五种叶类蔬菜地上部和根部的砷含量见表 2。植物在含砷培养液中生长两周后,5 种叶类蔬菜地上部分和根部的含砷量差异显著,地上部和根部的含砷量均在一定程度上表现出随培养液中砷含量增大而升高的趋势,从总体情况看,茼蒿、生菜、莴菜、芹菜和空心菜地上部分含砷量均值分别为 11.48、13.66、15.65、50.65、77.50 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,即芹菜和空心菜地上部分砷含量显著高于其余 3 种蔬菜。从其根部含砷量看,茼蒿、生菜、莴菜、芹菜和空心菜的含量均值分别为 728.65、549.05、262.95、573.31、521.84 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,与

地上部分含量比较,根部的含量远远高于地上部,即在作物根系中均相对累积了更多的砷,且仅有少部分砷由根系向地上部分转移。5 类蔬菜中,茼蒿根部含砷量均值要远高于其他蔬菜,但其地上部分含砷量均值则明显低于其他种类蔬菜。总体而言,5 种叶类蔬菜地上部砷含量的大小顺序为:空心菜>芹菜>莴菜>生菜>茼蒿。该结果与前述 5 种不同叶类蔬菜对砷的耐性指数结果具有很好的一致性,即对砷耐性指数大的叶类蔬菜,其地上部砷的含量相对较低,反之则地上部的砷含量较高。

2.2.2 作物对砷累积量的变化

图 2 显示了 5 种叶类蔬菜地上部对砷的累积量。可以看出,不同叶类蔬菜之间以及相同蔬菜种类不同砷浓度处理之间,蔬菜对砷的累积量均具有一定差异。随着培养液中砷浓度的增加,5 种叶类蔬菜地上部的砷累积量均表现出增加的趋势。不同蔬菜的累积量比较,空心菜地上部对砷浓度增加最为敏感,其累积量随着培养液中砷浓度的升高表现出较大幅度的增加。当培养液的砷浓度达到 $8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 或 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,莴菜和芹菜地上部砷的累积量出现显著增加,而生菜和茼蒿地上部的砷累积对培养液砷浓度的变化较不敏感。当培养液的砷浓度达到 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,空心菜地上部分对砷的累积量最高,为 $1623 \mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$,茼蒿对砷的累积量最低,为 $45.58 \mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$ 。与其他叶类蔬菜比较,茼蒿地上部分砷的累积量较小、累积能力较弱,且表现出较高的耐受性,该研究结果与地上部分生物量、耐性指数、砷含量等结果具有很好的一致性。

2.3 5 种蔬菜对砷的转移和生物富集系数比较

根据前述相关结果,计算了 5 种叶类蔬菜对砷的转移和生物富集系数(图 3)。可以看出,随着培养液中砷浓度的增加,莴菜和芹菜对培养液中砷的转移

表 2 5 种蔬菜地上部分和根部的砷含量(mg·kg⁻¹)

Table 2 The arsenic contents in the aerial parts and roots of five vegetable species(mg·kg⁻¹)

	品种	均值	CK	T1	T2	T3	T4	T5	T6
地上部分	苋菜	15.65	0.35±0.32	6.52±5.26	10.69±9.36	14.44±13.71	18.19±17.48	20.56±18.45	44.99±39.22
	芹菜	50.65	0.21±0.10	7.94±6.76	13.71±10.70	24.29±20.72	59.74±49.45	83.35±74.45	194.80±163.12
	生菜	13.66	0.57±0.40	3.30±1.94	3.49±3.05	10.37±9.82	12.06±9.83	26.62±25.32	48.15±36.67
	茼蒿	11.49	0.56±0.49	3.66±2.89	6.48±4.16	13.21±9.49	14.95±12.43	22.56±18.85	30.38±21.91
	空心菜	77.51	0.40±0.32	19.45±18.63	56.07±46.58	70.69±58.81	110.89±99.22	138.21±131.44	173.34±161.35
地下部分	苋菜	262.96	0.51±0.31	150.50±132.54	252.74±177.28	337.39±160.86	392.07 ± 319.94	408.99±380.17	547.49±416.95
	芹菜	537.31	0.25±0.20	132.02±107.58	236.40±225.10	341.87±336.82	555.70±552.30	937.22±885.83	1672.86±1538.81
	生菜	549.05	1.48±1.36	82.95±81.33	320.05±290.56	445.04±395.92	614.93±593.84	1003.24±885.83	2171.72±1959.61
	茼蒿	728.65	0.98±0.78	95.10±81.37	569.79±549.35	783.60±745.12	1094.49±998.66	1130.29±1064.41	1576.37±1512.98
	空心菜	521.84	1.37±0.58	153.05±115	303.95±232.69	638.33±469.23	769.33±630.33	947.33±850.51	1194.03±989.46

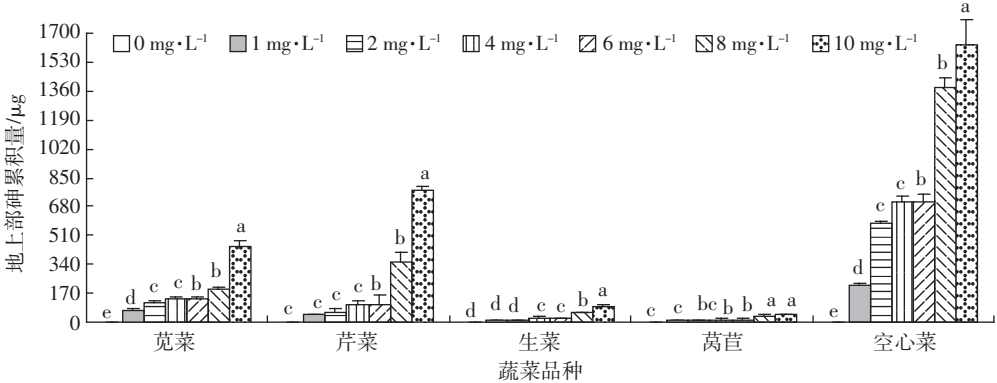


图 2 5 种蔬菜地上部分对砷的累积量

Figure 2 Arsenic accumulations of five vegetable species of the aerial parts

系数在一定程度上表现出增加的趋势，而空心菜和生菜对砷的转移系数则没有明显的变化规律。不同培养液砷浓度处理下，茼蒿、生菜、苋菜、芹菜和空心菜对砷的转移系数均值分别为 0.02、0.03、0.06、0.08 和 0.15，以茼蒿和生菜对砷的转移系数均较小，而空心菜对砷的转移系数最大(图 3a)。另外，不同叶类蔬菜对砷的生物富集系数也有一定差异，通过进一步计算不同培养液砷浓度下 5 种蔬菜对砷富集系数的均值可以发现，茼蒿和生菜对砷的生物富集系数最低、分别为 2.75 和 2.66，而空心菜对砷的生物富集系数最高、达 18.67(图 3b)。由此可见，茼蒿和生菜对砷的转移系数和生物富集系数均比其余 3 种蔬菜低，表明该 2 种蔬菜对环境砷的吸收能力以及砷由其根部向地上部转移的能力均较弱，或者说，与其他 3 种蔬菜相比较，茼蒿和生菜是对砷低吸收的品种。

3 讨论

3.1 砷对 5 种叶类蔬菜生长的影响

砷并非植物生长的必需营养元素，但低量的砷可

能会在一定程度上促进作物的生长，有研究表明，低剂量砷的刺激效应可能是由于砷作为一种催化剂，加快了促进植物生长的细胞分裂代谢过程^[19]。但是，当土壤中砷含量过高时，则会严重影响植物的生长和发育。一般认为，过量砷会干扰植物组织的新陈代谢过程，抑制植物的生长，甚至导致其死亡。砷对植物的影响主要取决于砷暴露浓度和植物种类。本研究结果表明，随着营养液中砷浓度的升高，5 种供试作物的生物量(干重)以及根系对砷的耐性指数均呈现出不同程度的下降，该结果与相关学者对日本芥末^[17]和对水稻^[18]的研究结果相一致。

植物对有毒元素的耐受性可以通过该有毒元素环境条件下植物生物量的变化来评估^[20]。本研究分析了不同培养液砷浓度下 5 种供试蔬菜地上部分生物量的变化(图 1)，结果显示不同种类蔬菜对砷的耐性表现出一定差异。随着培养液砷浓度的升高，茼蒿和生菜的地上部干重变化不显著，且该 2 种作物对砷的耐性系数也均明显高于其他 3 种蔬菜。因此，可以推断茼蒿和生菜在本实验所设置的培养液砷浓度下对砷具有较高的耐性。结合 5 种蔬菜对砷的转移与富集

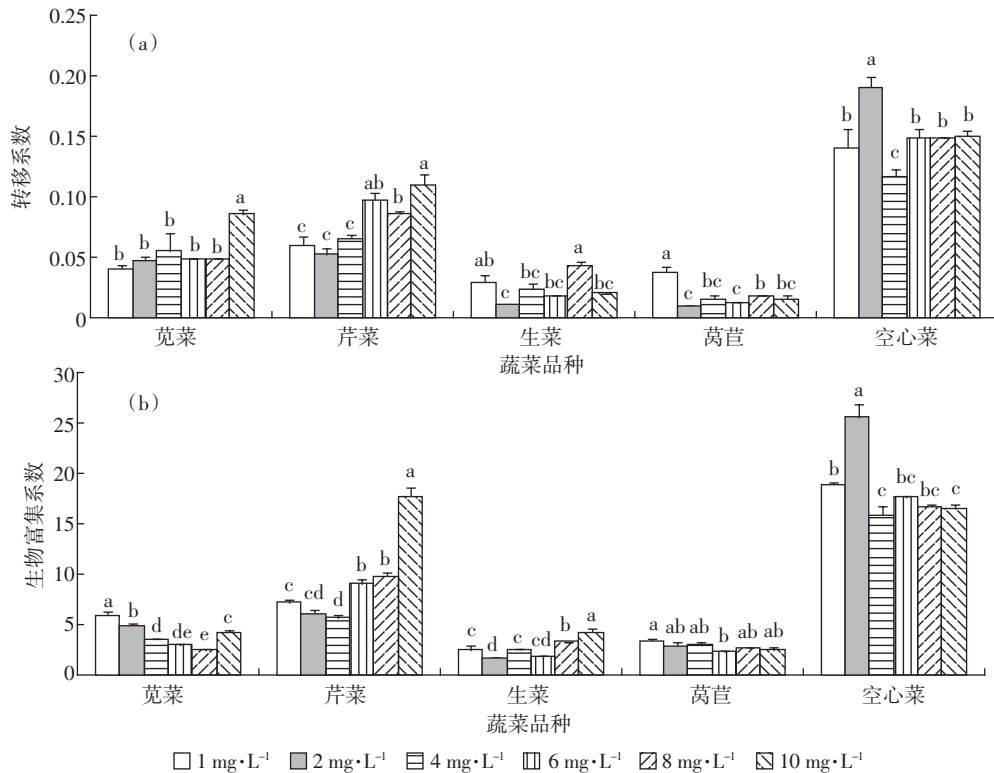


图 3 不同处理条件下 5 种蔬菜对砷的富集系数

Figure 3 The translocation and bioaccumulation factors of five vegetable species exposed to different concentration of As

系数分析, 茼蒿和生菜均能够将相对少量的砷累积到其体内, 且仅有少量砷从根部向地上部转移, 进而在一定程度上减少了培养环境中砷对其生长和产量的影响。此外, 对于莴菜、芹菜和空心菜而言, 其地上部生物量的降低可能是因为相对较高量的砷进入生物体后, 引起与作物生长相关酶活性的降低, 或者是由于砷的存在产生了氧化压力, 并进而在一定程度上抑制了其生长^[21-22]。

3.2 水培方法用于砷低吸收作物初步筛选的可能性和可行性

低吸收作物筛选和利用是砷超标农田中安全生产的重要前提之一, 近年来, 已有研究者开始关注砷低吸收作物筛选的相关研究, 但其方法注重于野外采集作物样本、实地种植等, 并将植物样品采集到实验室进行测定, 以此来判断作物对砷吸收的能力, 这种方法尽管能获得相应的结果, 但一是费工费时, 二是进展慢, 三是在很大程度上会受到土壤类型、土壤含砷量等因素的影响。很显然, 建立一套实验室快速筛选、鉴定作物对砷低吸收的方法, 对加快低吸收作物筛选和应用意义重大。从已有结果看, 不同种类作物对某种元素的摄取量和累积量是具有显著差异的, 这也是超富集植物、低吸收植物筛选的重要基础。一般

认为^[23], 筛选砷低吸收作物时应考虑以下几个参数: (1) 植物在含砷溶液或土壤中生长时, 地上部分生物量与空白对照组相比没有显著降低; (2) 与其他作物比较, 地上部分含砷量很低且通过测定根长得到的耐性指数较高; (3) 植物地上部分高度正常, 但对砷的转移能力和生物富集能力均较弱。在上述参数中, 植物地上部分砷浓度和生物量均是最重要的参数, 且作物体内的砷含量不应超过国家相关标准。

转移系数与富集系数常被用于评价植物对某种元素的反应特征, 而与土壤培养实验相比较, 水培实验的方法可以相对准确、快速地获得作物的生长状况, 采集作物样品, 进而分析其生物量、某种元素累积量等的变化。就这些参数获得的难易程度而言, 水培实验与土培的实验结果比较相对更为准确, 试验操作更加简单、所需时间相对更短。同时, 水培条件下可以对作物的生长条件如营养成分、温度、砷浓度等进行控制, 并进而实现周年培养。利用该方法, 可以首先从不同作物或相同作物不同基因型差异的角度, 确定一批对砷具有低吸收能力的作物基因型或品种, 再将筛选出的作物在大田加以验证, 达到大幅度减轻大田种植工作量等目的。从本研究的结果看, 通过水培实验方法, 能够初步确定不同作物对砷的吸收能力, 在一

定程度上证明了相关方法的可行性,但在实际应用时,还应建立相应的指标体系,才可能达到快速、准确筛选的目的。

4 结论

(1)随着培养液中砷浓度的增加,茼蒿、芹菜和空心菜地上部生物量均显著下降,而茼蒿和生菜地上部生物量的变化不明显,表现出对砷具有较高的耐性,其耐性指数平均分别达 90.1 和 85.7。

(2)在本实验所设置的培养液砷浓度条件下,茼蒿和生菜地上部对砷的累积量相对更低,且具有较低的砷转移和富集系数,其富集系数仅分别为空心菜的 14.7% 和 14.2%。

(3)通过对水培条件下 5 种作物生长和对砷吸收等参数的比较,可以初步认为茼蒿和生菜对砷的吸收能力较弱,属于低吸收砷的作物。

参考文献:

- [1] Fayiga A O, Ma L Q. Using phosphate rock to immobilize metals in soil and increase arsenic uptake by hyperaccumulator *Pteris vittata*[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 359: 17–25.
- [2] Fitz W J, Wenzel W W. Arsenic transformations in the soil–rhizosphere–plant system; Fundamentals and potential application to phytoremediation[J]. *Journal of Biotechnology*, 2002, 99: 259–278.
- [3] Tripathi R D, Srivastava S, Mishra S, et al. Arsenic hazards; Strategies for tolerance and remediation by plants[J]. *Trends in Biotechnology*, 2007, 25: 158–165.
- [4] Zhao F J, McGrath S P, Meharg A A. Arsenic as a food chain contaminant; Mechanisms of plant uptake and metabolism and mitigation strategies[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2010, 61: 7.1–7. 25.
- [5] Zhu Y G, Sun G X, Lei M, et al. High percentage inorganic arsenic content of mining impacted and non impacted Chinese rice[J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, 42: 5008–5013.
- [6] Tuli R, Chakrabarty D, Trivedi P K, et al. Recent advances in arsenic accumulation and metabolism in rice[J]. *Molecular Breeding*, 2010, 26: 307–323.
- [7] Williams P N, Islam M R, Adomako E E, et al. Increase in rice grain arsenic for regions of Bangladesh irrigating paddies with elevated arsenic in ground waters[J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, 40: 4903–4908.
- [8] Ma L Q, Komar K M, Tu C, et al. A fern that hyperaccumulates arsenic[J]. *Nature*, 2001, 409: 579.
- [9] 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春, 等. 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征. 科学通报, 2002, 47(3): 207–210.
CHEN Tong-bin, WEI Chao-yang, HUANG Ze-chun, et al. Arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. and its arsenic accumulation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(3): 207–210.
- [10] 韦朝阳, 陈同斌, 黄泽春, 等. 大叶井口边草——一种新发现的富集砷的植物[J]. 生态学报, 2002, 22(5): 777–778.
WEI Chao-yang, CHEN Tong-bin, HUANG Ze-chun, et al. Cretan Brake (*Pteris cretica* L.): An arsenic-accumulating plant[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(5): 777–778.
- [11] Lee J, Bae H, Jeong J, et al. Functional expression of a bacterial heavy metal transporter in *Arabidopsis* enhances resistance to and decreases uptake of heavy metals[J]. *Plant Physiology*, 2003, 133: 589–596.
- [12] Grant C A, Clarke J M, Duguid S, et al. Selection and breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 390: 301–310.
- [13] Yu H, Wang J L, Fang W, et al. Cadmium accumulation in different rice cultivars and screening for pollution-safe cultivars of rice[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 370: 302–309.
- [14] Uchino T, Roychowdhury T, Ando M, et al. Intake of arsenic from water, food composites and excretion through urine, hair from a studied population in West Bengal, India[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2006, 44: 455–461.
- [15] Xiao X Y, Chen T B, Liao X Y, 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.
- [16] Mattina M, Iannucci-Berger W, Musante C, et al. Concurrent plant uptake of heavy metals and persistent organic pollutants from soil[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 124: 375–378.
- [17] Shaibur M R, Nobuyuki Kitajima, Imamul Huq S M, et al. Arsenic-iron interaction; Effect of additional iron on arsenic-induced chlorosis in barley grown in water culture[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2009, 55: 739–746.
- [18] LIU Quan-ji, HU Cheng-xiao, TAN Qi-ling, et al. Effects of As on As uptake, speciation, and nutrient uptake by winter wheat (*Triticum aestivum* L.) under hydroponic conditions[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20: 326–331.
- [19] Nyitrai P, Boka K, Gáspár L, et al. Rejuvenation of ageing bean leaves under the effect of low-dose stressors[J]. *Plant Biology*, 2004, 6: 708.
- [20] Sun Y B, Zhou Q X, Wang L, et al. Cadmium tolerance and accumulation characteristics of *Bidens pilosa* L. as a potential Cd-hyperaccumulator[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 161: 808–814.
- [21] Mishra S, Dubey R S. Inhibition of ribonuclease and protease activities in arsenic exposed rice seedlings; Role of proline as enzyme protectant[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2006, 163: 927–936.
- [22] Singh H P, Batish D R, Kohli R K, et al. Arsenic-induced root growth inhibition in mung bean (*Phaseolus aureus* Roxb.) is due to oxidative stress resulting from enhanced lipid peroxidation[J]. *Plant Growth Regulation*, 2007, 53: 65–73.
- [23] Liu W T, Zhou Q X, Jing A, et al. Variations in cadmium accumulation among Chinese cabbage cultivars and screening for Cd-safe cultivars[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 173: 737–743.