

适于砷轻度超标土壤种植的根菜品种的筛选

周 芬^{1,3}, 黄贵凤², 丁昌峰^{1,3}, 王兴祥^{1,3*}

(1.中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室, 南京 210008; 2.江西省贵溪市环境保护局, 江西 贵溪 335400; 3.中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:采用温室盆栽试验研究潮土和红壤旱地中砷对萝卜、胡萝卜以及马铃薯生长的影响,分析不同品种对砷富集积累能力差异。结果表明,砷处理下所有品种生物量响应存在显著的基因型差异,满堂红萝卜和荷兰 15 号马铃薯在 2 种土壤不同砷处理条件下均具有很好耐性;齐头黄胡萝卜在红壤条件下生长受阻,耐性最低。不同品种可食部位砷含量以及富集积累能力也存在显著差异($P<0.05$),满堂红萝卜在潮土的砷处理中砷含量超过我国食品安全砷标准($0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 鲜重),马铃薯的 4 个品种和扬花萝卜可食部位有效富集系数较低。在 12 个根菜品种中,荷兰 15 号马铃薯对砷的富集积累能力低,并且对砷具有较高的耐性,在砷轻度超标的中性土壤(砷超标范围为 $30\sim 45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和酸性土壤(砷超标范围为 $40\sim 60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)种植荷兰 15 号马铃薯风险相对较低。

关键词:萝卜;胡萝卜;马铃薯;As;有效富集系数

中图分类号:X173 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)10-1984-08 doi:10.11654/jaes.2013.10.012

Screening of Suitable Rootstalk Vegetable Cultivars for the Adaptation to Slightly As Contaminated Soils

ZHOU Fen^{1,3}, HUANG Gui-feng², DING Chang-feng^{1,3}, WANG Xing-xiang^{1,3*}

(1.Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2.Environmental Protection Bureau of Guixi City, Jiangxi Province, Guixi 335400, China; 3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A pot experiment was carried out to study the effects of arsenic (As) pollution on the biomass and As accumulation in 12 cultivars of three rootstalk vegetable species (radish, carrot and potato) grown in fluvo-aquic soil (FS) and red soil (RS). The results indicated that there was a significant difference in the biomass response among 12 cultivars ($P<0.05$). Compared with CK (no As addition), radish Mantanghong, carrot Korea red 9-inch and potato Netherland 15 had a significant increase in their edible biomass both in As1 ($30.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ addition for RS and $22.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ for FS) and As2 treatment ($60.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ addition for RS and $45.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ for FS), indicating their strong tolerance to As, while carrot Qitouhuang had a significant decrease in biomass and showed the weakest tolerance to As. Different cultivars showed a significant difference in As accumulation capacity ($P<0.05$). As in edible parts of the 12 cultivars was higher in FS than that in RS. Radish Mantanghong was the only one with As exceeded the Chinese Food Hygiene Standard ($0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ fresh weight), and was unsuitable to be cultivated in As-polluted soils, although its biomass significantly increased under As treatments. Potato Netherland 15 consistently showed lower As concentration in both soils. Four potato cultivars and radish Yanghua had the lowest available bioconcentration factors of As. Among the 12 cultivars, planting potato Netherland 15 in soils with slight As contamination ($30\sim 45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $40\sim 60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ for FS and RS, respectively) had the lowest health risk.

Keywords: radish; carrot; potato; arsenic; available bioconcentration factor

随着我国经济的迅猛发展,砷污染问题也日益严重,如广西河池砷污染、云南阳宗海砷污染、河南民权

县砷污染等,对人类健康构成严重威胁^[1-3]。有调查显示,在我国砷污染区有 32.2% 的蔬菜砷含量超标,其中叶菜类和根菜类的超标率分别为 47.9% 和 12.8%^[4]。在湖南郴州邓家塘,人体通过食用蔬菜摄入的砷量远超过 WTO 限定的安全标准^[5]。可见砷污染对人体健康已构成一定安全风险。

收稿日期:2013-01-31

基金项目:国家农业行业科研专项(200903015)

作者简介:周 芬(1985—),女,安徽安庆人,硕士研究生,主要从事土壤重金属风险管理方面的研究。E-mail:zhoufen@issas.ac.cn

* 通信作者:王兴祥 E-mail:xxwang@issas.ac.cn

重金属污染的土壤将会长期存在,由于高昂的治理成本和技术难度目前无法将所有污染土壤修复成清洁土壤,通过筛选和应用低积累高耐性作物是一个减少重金属进入食物链、降低健康风险的有效方法,并在向日葵和小麦上成功应用^[6-7]。土壤性质是影响植物吸收砷的一个重要因素,不同土壤的理化性质和农田耕作管理措施对砷存在形态和转移能力有重要的影响^[8-11]。肖细元等^[4]根据国内外文献报道总结出不同种类蔬菜砷浓度由大到小依次为叶菜类>根茎类>茄果类>鲜豆类。实际上,作物对砷污染的响应不但与蔬菜种类有关,同时与基因型(品种)有关,如安堇达^[12]研究发现 15 个不同基因型的黄瓜品种存在明显的基因型差异。

本文选取日常生活中需求量大的萝卜、胡萝卜和马铃薯 3 类根菜各 4 个品种,研究其在砷处理潮土、红壤中生物量变化和砷吸收积累特征,从而为砷轻度超标的潮土、红壤旱地根菜品种的选择以及保障农产品质量安全提供重要参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

土壤均采自耕层(0~20 cm),风干后过 2 mm 筛用于盆栽试验。土壤分别为鹰潭红壤和天津潮土,其理化性质见表 1。选取常见的三大类根菜萝卜(*Raphanus sativus* L.)、胡萝卜(*Daucus carota* L.)和马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)各 4 个品种(表 2),其中扬花萝卜为南京地方品种,浙大长萝卜为浙江省主要栽培品种,马铃薯鲁引 1 号、郑薯 6 号以及渝薯 1 号分别是山东、河南以及重庆的主栽培品种,其他品种在我国各地均有一定种植面积。

1.2 试验设计

试验在中国科学院南京土壤研究所温室内进行,将采回来的土壤样风干过筛后称重 7 kg,分别添加我国土壤环境质量标准(GB 15618—1995)砷二级标准 40 mg·kg⁻¹(pH<6.5)、30 mg·kg⁻¹(6.5<pH<7.5)的 0.75 倍和 1.5 倍,即红壤上低浓度处理 As1(30.0 mg·kg⁻¹)、高浓度处理 As2(60.0 mg·kg⁻¹),潮土上低浓度处理 As1(22.5 mg·kg⁻¹)、高浓度处理 As2(45.0 mg·kg⁻¹)的

表 2 供试根菜品种及其含水量

Table 2 Species of the selected vegetables and water content of edible parts

作物类	序号	品种名	含水量/%
萝卜	R1	扬花萝卜	87.4
	R2	满堂红	87.9
	R3	碧绿水果萝卜	86.9
	R4	浙大长萝卜	84.4
胡萝卜	C1	新黑田五寸参	87.1
	C2	三红八寸参	87.7
	C3	高丽红九寸参	87.1
	C4	齐头黄胡萝卜	87.9
马铃薯	P1	鲁引 1 号	83.6
	P2	郑薯 6 号	80.2
	P3	渝薯 1 号	81.2
	P4	荷兰 15 号	81.3

外源 As($\text{Na}_3\text{AsO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$,以溶液形式添加),同时设置不添加外源 As 的对照(CK),每个处理重复 3 次。与土样充分混匀后,装入直径 30 cm、高 26 cm 的塑料盆中,保持田间持水量 80%,老化 3 个月用于盆栽试验。

播种之前分别按每千克土添加 0.15 g N(尿素)、0.05 g P(磷酸二氢钙)以及 0.01 g K(硫酸钾)的施肥量与土壤充分混合均匀后装盆。2010 年 8 月底开始播种,蔬菜出苗后根据萝卜、胡萝卜以及马铃薯蔬菜种类个体差异以及田间种植密度及时间苗,其中扬花萝卜(R1)由于个体较小为 6 株·盆⁻¹,其他品种萝卜和胡萝卜均为 3 株·盆⁻¹,马铃薯(每株地下块茎数目 1~2 块)2 株·盆⁻¹。根据蔬菜的生长和天气情况控制适宜的水分,保证蔬菜良好的生长条件。待 11 月底 12 月初蔬菜成熟后按盆收获植物可食部位和地上部位,运送到实验室用自来水、去离子水、超纯水清洗后称重,地下可食部位匀浆后待测砷浓度和含水量,地上茎叶部杀青烘至恒重后粉碎待测。采集(0~20 cm)盆栽耕层土壤样晾干磨细过 2 mm 和 0.149 mm 筛待测。

1.3 分析方法

植物地下可食部和地上部组织采用添加 $\text{HNO}_3\text{:H}_2\text{O}_2(4:3)$ 的高压消煮罐消煮(GB/T 5009.11—2003),

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 The properties of tested soils

土壤	pH	有机质/g·kg ⁻¹	CEC/cmole·kg ⁻¹	活性铁铝氧化物/g·kg ⁻¹	黏粒/%	全磷/mg·kg ⁻¹	Olsen-P/mg·kg ⁻¹	全砷/mg·kg ⁻¹
潮土	6.93	17.06	24.13	2.44	36.5	0.66	10.05	9.5
红壤	4.84	9.36	9.31	4.41	45.8	0.48	20.29	15.0

土壤基本化学性质 pH(H₂O 浸提,水土比为 2.5:1)、有机质、CEC 以及作物地下可食部位含水量分别用电位法、高温外热重铬酸钾氧化容量法、乙酸铵法和恒温恒压干燥法测定^[13]。土壤全量砷采用王水消煮法(GB/T 22105.2—2008),有效态采用 NaHCO₃ 提取法(Olsen and Sommers, 1982)^[14]。消煮以及测定过程带有菠菜组织标准物质(GBW10015)和土壤标准物质(GBW07444、GBW07445)进行质量控制,其加标回收率均在 85%~105%之间。As 的测定使用原子荧光光谱法(AF-610)。

1.4 数据分析

土壤中砷含量一般用总量和有效态表示。这里选用富集系数(BCF)和有效富集系数(BCF_{avail})来考察不同根菜可食部位对土壤砷的富集作用,并定义为:

$$BCF = \frac{C_p}{C_s}, BCF_{\text{avail}} = \frac{C_p}{C_a}$$

式中: C_p 为植株可食部位砷浓度(鲜样测定); C_s 、 C_a 分别为土壤中总砷浓度和有效态砷浓度。

采用 Microsoft Excel 2007、SPSS 16.0、Origin 7.5 进行数据的统计处理。不同砷处理间的差异性显著性

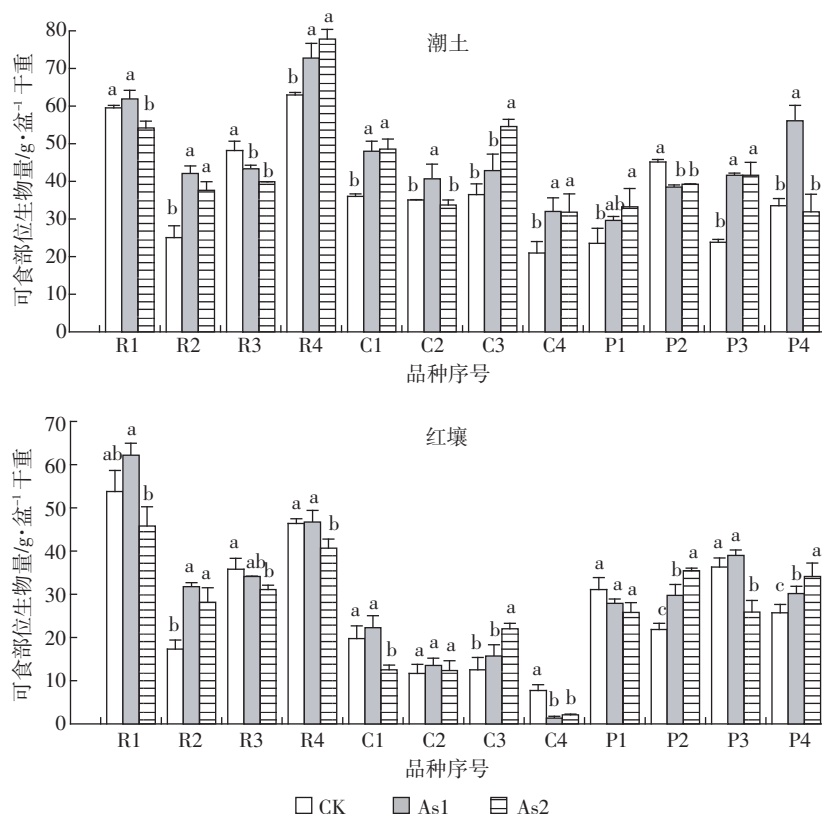
分析采用 LSD 法。

2 结果与分析

2.1 不同根菜品种可食部位生物量差异

图 1 为 3 类根菜在潮土、红壤上可食部位生物量。相对于对照组来说,潮土中满堂红萝卜(R2)、浙大长萝卜(R4)、新黑田五寸参(C1)、齐头黄胡萝卜(C4)以及马铃薯渝薯 1 号(P3)在 As₁、As₂ 条件下,可食部位生物量均显著增加 ($P < 0.05$); 三红八寸参(C2)以及荷兰 15 号马铃薯(P4)在 As₁ 条件下可食部位产量显著增加 ($P < 0.05$),而 As₂ 条件下相对于对照组产量没有显著性差异 ($P > 0.05$); 碧绿水果萝卜 R3 和郑薯 6 号(P2)在 2 个砷污染条件下可食部位的产量均显著减少 ($P < 0.05$)。

相对于对照组来说,红壤中满堂红萝卜(R2)、高丽红九寸参(C3)、郑薯 6 号(P2)以及荷兰 15 号马铃薯(P4)可食部位生物量在 As 污染条件下出现不同程度的增加; 扬花萝卜(R1)、新黑田五寸参(C1)以及渝薯 1 号(P3)在低浓度 As 处理下有一定程度的增产,而高浓度 As 处理下产量显著减少 ($P < 0.05$); 此外齐



不同小写字母表示同品种不同处理间差异显著, $P < 0.05$ 。下同

图 1 可食部位生物量

Figure 1 The biomass of the edible parts of tested cultivars grown in fluvo-aqueic soil and red soil under different As treatments

头黄胡萝卜(C4)在 2 种 As 浓度处理下可食部位产量均显著下降($P<0.05$),鲁引 1 号马铃薯(P1)在试验处理条件下产量没有显著变化($P>0.05$)。

2.2 根菜吸收 As 的品种差异

供试根菜地下可食部位的砷含量如图 2 所示。满堂红萝卜(R2)可食部位在潮土 As2 条件下超过我国食品卫生砷安全标准(NFHSC,GB 2762—2005,0.05 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 鲜重),其他品种均未超过国家食品安全标准;萝卜 4 个品种中以扬花萝卜(R1)砷含量最低,马铃薯 4 个品种砷含量均低于萝卜和胡萝卜。红壤上 12 个品种均未超过我国食品卫生安全标准,不同砷

处理下可食部位砷含量最高的品种有齐头黄胡萝卜(C4)、满堂红萝卜(R2),而可食部位砷含量最低的品种是鲁引 1 号马铃薯(P1)。

潮土和红壤根菜地上部茎叶中的砷浓度(均按照烘干重计)远高于地下可食部位(图 2、图 3)。潮土 As 处理条件下,地上部砷浓度以满堂红萝卜(R2)最高,其次是郑薯 6 号马铃薯(P2),胡萝卜的砷浓度含量均较低;红壤 As 处理条件下,地上部砷浓度则是以郑薯 6 号(P2)、渝薯 1 号(P3)以及荷兰 15 号马铃薯(P4)的砷浓度最高,其次为萝卜,而胡萝卜地上部砷浓度相对较低。

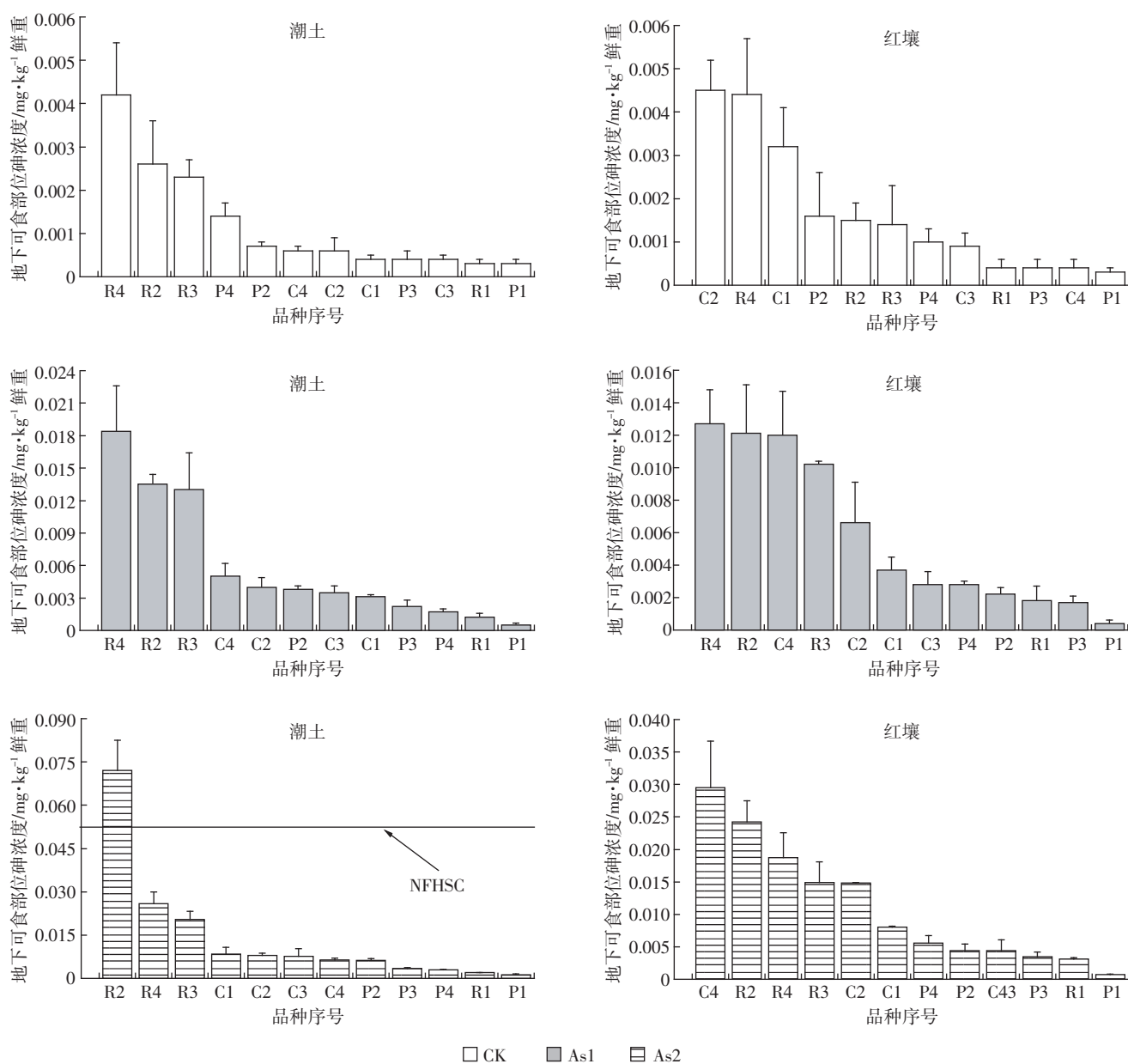


图 2 可食部位砷浓度

Figure 2 Arsenic concentration in edible parts of tested cultivars under different As treatments

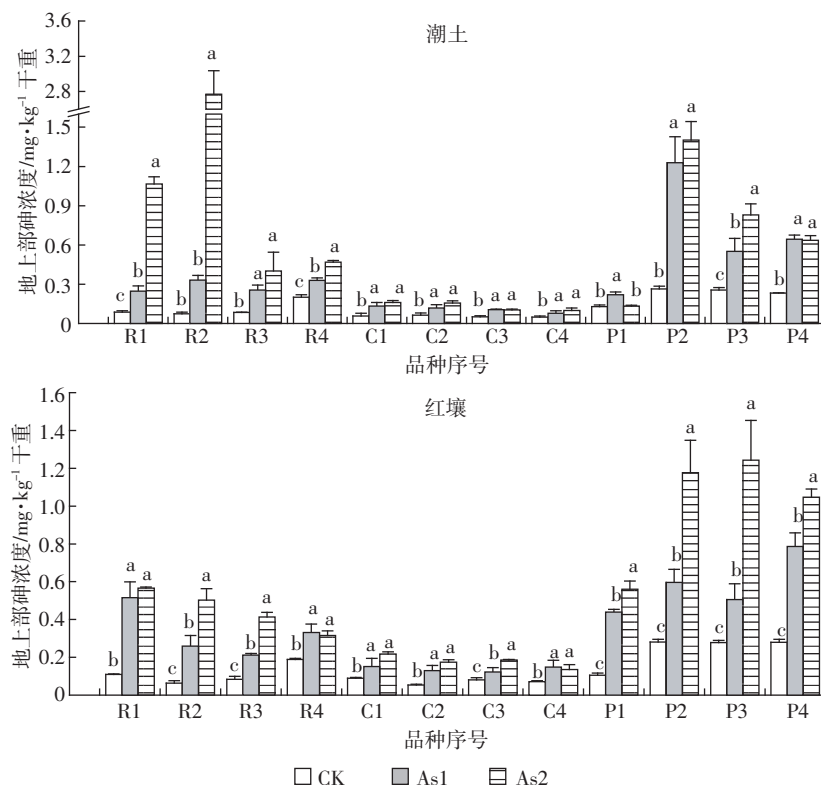


图 3 地上部砷浓度

Figure 3 Arsenic concentration in aerial parts of tested cultivars under different As treatments

2.3 不同品种可食部位 As 生物富集系数的差异

从图 4 可以看出,12 个供试品种可食部位的 BCF 均低于 0.02,但品种间存在品种差异。12 个品种在两种土壤上均以马铃薯的 4 个品种和扬花萝卜 (R1) 对砷的富集能力较低。同时,土壤类型对作物富集系数有很大影响。潮土上 7 个品种根菜砷处理组的砷富集系数显著高于对照组 ($P < 0.05$),红壤中则有 5 个品种对照组砷富集系数显著高于砷处理 ($P < 0.05$)。潮土有效态的砷含量高于红壤(潮土、红壤有效态砷浓度分别是 As1 条件下 2.26 、 $1.84 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; As2 条件下 3.80 、 $3.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),不同品种间有效富集系数与富集系数的变化规律不完全一致,潮土上除 3 个胡萝卜品种不同处理间的有效富集系数变化差异不显著 ($P > 0.05$) 外,其中有 7 个品种对照组有效砷富集系数显著高于砷处理组 ($P < 0.05$);而红壤上除齐头黄胡萝卜 (C4) 外的 11 个品种的有效富集系数对照组显著高于其他处理 ($P < 0.05$),地下可食部位在 As1、As2 条件下的 BCF_{avail} 均相近。另外,在外源 As 添加条件下,潮土上以满堂红萝卜有效富集系数最高;红壤上齐头黄胡萝卜有效富集系数虽然不高,但呈现随着土壤砷含量增加而增加的现象。

3 讨论

3.1 As 污染对不同品种根菜生物量的影响

砷不是植物生长的必需元素,其由植物根系吸收进入体内,过量的砷可降低植物蒸腾作用,抑制根系活性,从而影响植物对养分和水分的吸收,出现受害症状,最终通过生长状况和产量变化表现出来^[15]。有研究表明,土壤添加砷也存在低浓度刺激生长的效应,但当土壤的砷含量达到一定程度时会对植物的生长产生危害,且土壤外源砷含量越大,危害程度越大^[16]。不同蔬菜品种对砷的耐受能力存在差异,如刘华琳等^[17]关于不同基因型玉米对砷胁迫的影响研究表明玉米对砷的耐性确实存在显著的基因型差异。

本试验表明(图 1)潮土和红壤旱地中不同根菜品种对砷污染的耐性也存在基因型差异 ($P < 0.05$)。其中潮土 As 处理条件下,碧绿水果萝卜、郑薯 6 号随着外源砷添加量的增加生物量减小,砷毒害已经影响到它的生长,余下的 10 个品种根菜均能较好的生长在潮土上;红壤上 As 处理条件下,齐头黄胡萝卜的生长发育受到严重危害。满堂红萝卜以及荷兰 15 号马铃薯在两种土壤上不同砷处理下都很好的生长,但满堂红

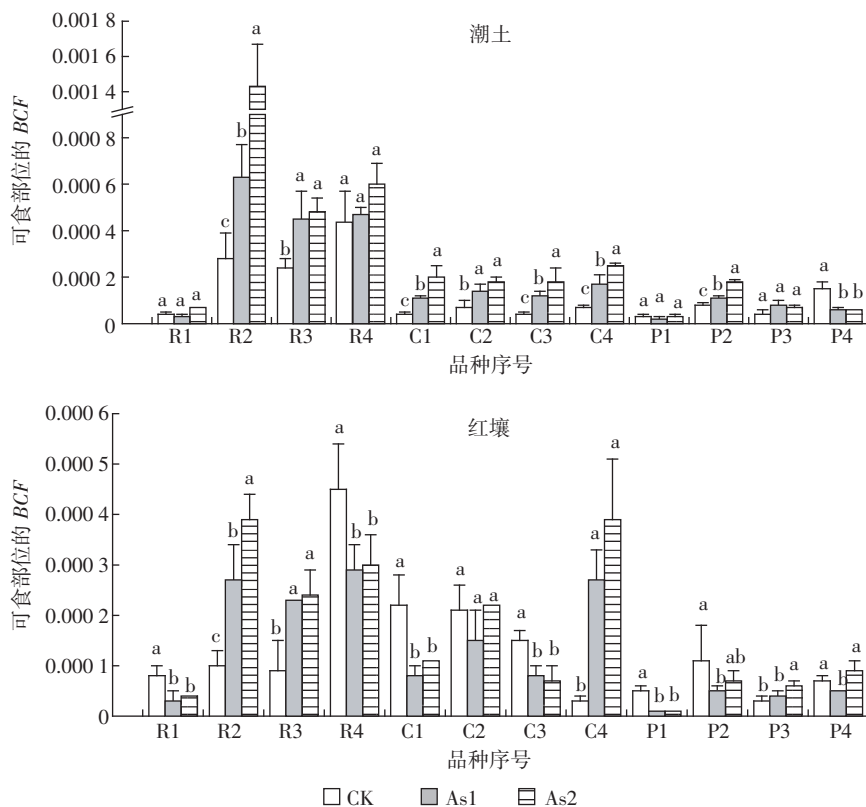


图 4 地下可食部位富集系数

Figure 4 Bioconcentration factors (BCF) of the tested cultivars under different As treatments

萝卜可食部位砷浓度含量在潮土上已经超过我国食品卫生标准。因此,仅以生物量的变化作为土壤污染和品种筛选的指标显然不合适,甚至是有风险的。

3.2 不同品种间可食部位砷的吸收积累差异

在不同砷处理下,根菜类蔬菜砷分布一般规律为地下可食部位<地上茎叶(图 2、图 3),且作物随着外源砷添加量的增加植物组织中砷含量也增加。这与 Warren 等^[18]、Dahal 等^[19]研究结果一致。对于蔬菜来说,不同品种由于外部结构和内部结构不同,吸收重金属的生理生化机制也不同,所以对重金属的吸收积累也存在较大差异。但对于不同蔬菜的差异,不同人的调查结果并不完全一致,如蔡保松等^[20]对郴州砷污染区调查认为种植萝卜、白菜、辣椒、甘蓝等蔬菜不易积累砷,而陈同斌等^[21]研究表明,萝卜、白菜、甘蓝等对砷的吸收较多,而辣椒的吸收较少。造成这种不一致的原因有可能是同类蔬菜的不同品种对砷敏感性不同引起的。

富集系数用来表示重金属从土壤转移到植物体的能力。土壤是一个复杂的体系,砷可以多种形态存在,其中和生物体紧密联系的是其有效态,所以同时也用有效富集系数来表征重金属在土壤-植物实际转

移能力。实验中根菜可食部位的砷富集系数远远低于 Kloke 等^[22]研究的土壤-植物砷富集系数(0.01~0.1);可食部位有效富集系数范围(图 5)低于 Huang 等^[23]调查的福建郊区蔬菜砷的有效富集系数(0.01~0.12),可能是盆栽模拟试验测定植物鲜样可食部位砷浓度和植物品种差异以及土壤性质不同引起的。

扬花萝卜和 4 个品种的马铃薯呈现出在砷处理下可食部位砷含量低(图 2),地上茎叶砷含量高的现象(图 3)。有研究表明,甘薯块根中的 Cd 累积是块根吸收和茎叶转运共同作用的结果^[24],可以推测扬花萝卜和马铃薯可能是因地上部茎叶的转运作用致使可食部位块根和块茎砷吸收积累少。有研究表明,根对阻隔砷进入植物体可食部位过程至关重要,它也是砷含量最高、积累量最大的器官^[25]。齐头黄胡萝卜在红壤砷处理下生长严重受阻,地上部矮小,可食部位还没有膨大,主要以吸收根的形式存在,这就导致实验测定其可食部位砷浓度很高,砷处理下富集系数较高。

3.3 土壤类型对根菜生物量及富集系数的影响

供试潮土 pH 近中性,土壤有机质、CEC 高于红壤有利于促进作物生长,因此潮土上根菜生物量普遍

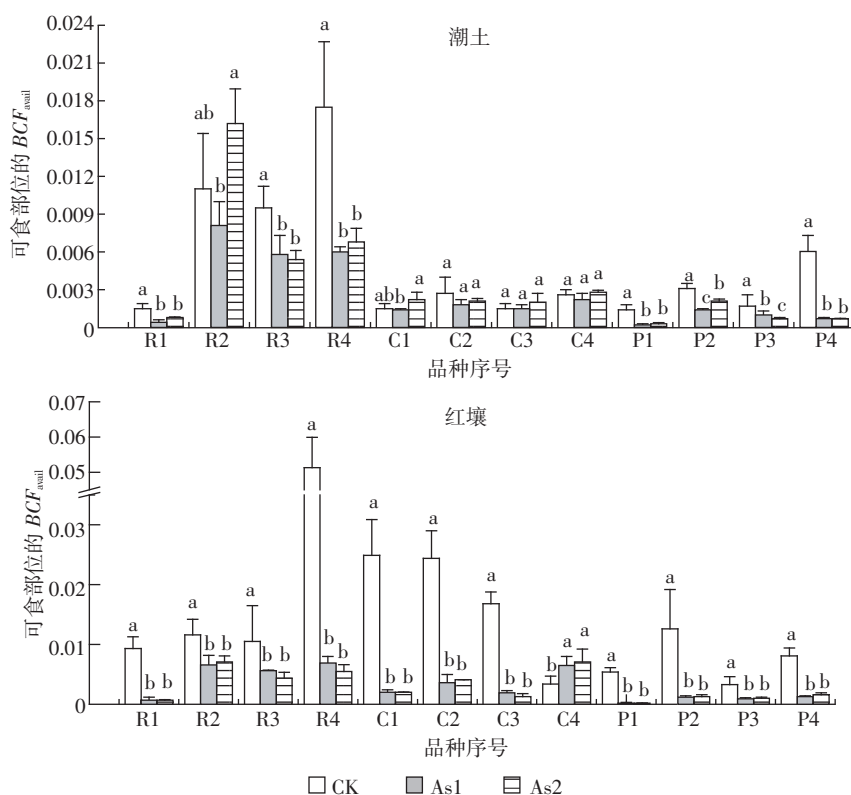


图 5 可食部位有效富集系数

Figure 5 Available bioconcentration factors (BCF_{avail}) of the tested cultivars under different As treatments.

高于红壤上相应的处理。同时,土壤理化性质影响外源砷的存在形态。有研究表明,低 pH、高铁铝氧化物以及高黏粒含量的土壤上外源砷可以更好地被吸附,毒害也就随之减轻^[9]。本研究中虽然潮土的外源砷添加量不及红壤,但潮土 pH 高于红壤、活性铁铝氧化物和黏粒含量不及红壤可能使得土壤中砷的有效态高于红壤。因此,总体看来在潮土中大部分品种的 As 有效富集系数高于红壤。

4 结论

在我国土壤环境质量标准二级标准 1.5 倍范围的砷轻度污染土壤(潮土、红壤)上,不同根菜品种的生物量存在显著的基因型差异,满堂红萝卜生物量增加最大,对砷污染的耐性较高;而齐头黄胡萝卜生物量降幅最大,对砷的耐性较低。

不同根菜品种可食部位对砷的富集积累能力有显著差异。齐头黄胡萝卜、满堂红萝卜、碧绿水果萝卜以及浙大长萝卜砷的富集能力较其他根菜品种强;而扬花萝卜以及马铃薯的 4 个品种富集积累能力均较弱,具有较高的耐性。综合考虑砷超标土壤中几种根菜生物量和砷富集积累能力,本研究中荷兰 15 号马

铃薯比其他品种根菜更加适合种植在砷轻度超标的土壤上。

参考文献:

- [1] 王振华, 何滨, 潘学军, 等. 云南阳宗海污染水平、变化趋势以及风险评估[J]. 中国科学: 化学, 2011, 41(3): 556-564.
WANG Zhen-hua, HE Bin, PAN Xue-jun, et al. The levels, trends and risk assessment of arsenic pollution in Yangzonghai Lake, Yunnan[J]. *Scientia Sinica Chimica*, 2011, 41(3): 556-564.
- [2] Zhu Y G, Sun G X, Lei M, et al. High percentage inorganic arsenic content of mining impacted and nonimpacted Chinese rice[J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, 42: 5008-5013.
- [3] Lu Y, Yin W, Huang L B, et al. Assessment of bioaccessibility and exposure risk of risk of arsenic and lead in urban soils of Guangzhou City, China[J]. *Environmental Geochemistry Health*, 2011, 33: 93-102.
- [4] 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.
- [5] 谢华, 廖晓勇, 陈同斌, 等. 污染农田中植物的砷含量及其健康风险评估[J]. 地理研究, 2005, 24(1): 151-159.
XIE Hua, LIAO Xiao-yong, CHEN Tong-bin, et al. Arsenic in plants of

- farmland and its healthy risk, Chenzhou City, Hunan Province[J]. *Geographical Research*, 2005, 24(1):151-159.
- [6] Li Y M, Channey L R, Schneiter A A. Genotypic variation in kernel cadmium concentration in sunflower germplasm under varying soil conditions[J]. *Crop Science*, 1995, 35:137-141.
- [7] Penner G A, Clarke J, Bezel J, et al. Identification of PAPD markers linked to a gene governing cadmium uptake in durum wheat[J]. *Genome*, 1995, 38:543-547.
- [8] Pongratz R. Arsenic speciation in environmental samples of contaminated soil[J]. *Science of the Total Environment*, 1998, 224(1-3):133-141.
- [9] Sadiq M. Arsenic chemistry in soils:overview of thermodynamic prediction and field observations[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 1997, 93(1-4):117-136.
- [10] Woolson E A, Axley J H, Kearney P C. The chemistry and phytotoxicity of arsenic in soils:I. Contaminated field[J]. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1971a, 35(6):938-943.
- [11] 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 and Technology*, 2009, 43: 3778-3783.
- [12] 安堃达. 不同耐砷性蔬菜基因型的筛选及对砷胁迫的响应研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2011.
- AN Kun-da. The selection of arsenic-tolerant vegetable genotypes and response to arsenic[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011.
- [13] 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.
- LU Ru-kun. Methods of soil agrochemistry analysis[M]. Beijing:China Agriculture Press, 2000.
- [14] Olsen S R, Sommers L E. Methods of soil analysis:Part 2[M]. Madison: American Society of Agronomy, Inc., 1982.
- [15] 黄益宗, 朱永官, 胡 莹, 等. 不同品种大豆对砷吸收积累和分配的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(6):1397-1401.
- HUANG Yi-zong, ZHU Yong-guan, HU Ying, et al. Uptake and accumulation of arsenic by different soybean Varieties[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(6):1397-1401.
- [16] Smith E, Juhasz A L, Weber J. Arsenic uptake and speciation in vegetables grown under greenhouse conditions[J]. *Environmental Geochemistry Health*, 2009, 31:125-132.
- [17] 刘华琳, 郝玉波, 慈晓科, 等. 不同基因型玉米对砷胁迫的响应[J]. 核农学报, 2010, 24(4):704-712.
- LIU Hua-lin, HAO Yu-bo, CI Xiao-ke, et al. The response of different genotypic maize to arsenic[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2010, 24(4):704-712.
- [18] Warren G P, Alloway B J, Lepp N W, et al. Field trials to assess the uptake of arsenic by vegetables from contaminated soils remediation with iron oxides[J]. *Science of the Total Environment*, 2003,311(1-3):19-33.
- [19] Dahal B M, Fuerhacker M, Mentler A, et al. Arsenic contamination of soils and agricultural plants through irrigation water in Nepal[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 155:157-163.
- [20] 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):711-715.
- 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):711-715.
- [21] 陈同斌, 宋 波, 郑袁明, 等. 北京市蔬菜和菜地土壤砷含量及其健康风险分析[J]. 地理学报, 2006, 61(3):297-310.
- CHEN Tong-bin, SONG Bo, ZHENG Yuan-ming, et al. A survey of arsenic concentrations in vegetables and soils in Beijing and the potential risks to human health[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(3):297-310.
- [22] Kloke A, Sauerback D R, Vetter H. The contamination of plants and soils with heavy metals and the transport of metals in terrestrial food chains[J]. *Dahlem Workshop Reports, Life Sciences Research Report*, 1984:113-141.
- [23] Huang R Q, Ga S F, Wang W L, et al. Soil arsenic availability and the transfer of soil arsenic to crops in suburban areas in Fujian Province, Southeast China[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 368:531-541.
- [24] 刘昭兵, 纪雄辉, 田发祥, 等. 不同基因型甘薯吸收积累 Cd 的特征差异性研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(9):1653-1658.
- LIU Zhao-bing, JI Xiong-hui, TIAN Fa-xiang, et al. Absorption and accumulation of Cd in different sweet potato (*Ipomoea batatas* Lam.) genotype[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(9):1653-1658.
- [25] Gulz P A, Gupta S K, Schulin R. Arsenic accumulation of common plants from contaminated soils[J]. *Plant and Soil*, 2005, 272:337-347.