

不同水稻品系幼苗对砷 (As) 的耐性、吸收及转运

刘志彦^{1,2}, 陈桂珠^{1,*}, 田耀武³

(1. 中山大学环境科学与工程学院, 广州 510275; 2. 聊城大学环境与规划学院, 聊城 252059; 3. 中山大学生命科学学院, 广州 510275)

摘要:利用琼脂培养基模拟水稻生长的厌氧环境,研究了 As 对不同水稻品系幼苗生长的影响以及 As 在其体内的积累及转运特性。结果表明,不同浓度(0~4.0mg/L)的 As 对供试水稻品系根部干物质积累无显著影响($P > 0.05$)。杂交稻与糯稻的地上部干物质积累随基质中 As 浓度的增加呈减小趋势,但低剂量的 As(0.5mg/L)促进常规稻的生长。水稻地上部的 As 积累量随基质中 As 浓度的升高总体均呈增加趋势。水稻根系对 As 具有较强的吸收与累积能力。水稻根部 As 的积累量为 156.31~504.03mg/kg,占总 As 含量的 63.40~81.90%,远远高于其地上部 As 的积累量。相比于其它两个品系,糯稻的生物量积累高,耐性指数较大,根部及地上部对 As 的积累量较低,因此更适合种植在 As 污染土壤。

关键词:品系;砷(As);杂交稻;常规稻;糯稻

文章编号:1000-0933(2008)07-3228-08 中图分类号:Q143 文献标识码:A

Arsenic tolerance, uptake and translocation by seedlings of three rice cultivars

LIU Zhi-Yan^{1,2}, CHEN Gui-Zhu^{1,*}, TIAN Yao-Wu³

1 School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou, 510275, China

2 College of Environment & Planning, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China

3 School of Life Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou, 510275, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(7): 3228~3235.

Abstract: In agar nutrient solutions as simulating the anaerobic conditions, effect of arsenic (As) on the growth and As uptake by hybrid, conventional and glutinous rice cultivars were studied. It showed that the root dry weights of three rice cultivars insignificant effect when treated by different As concentrations. The shoot dry weights of hybrid and glutinous decreased with the increasing As concentrations, while low concentrations of As (0.5 mg L^{-1}) could enhance the growth of conventional rice. Generally, As concentrations in root and shoot increased as the increasing As concentrations of treatment solutions. The root system had a strong ability to uptake and accumulate As. The root As concentrations ranged from 156 to 504 mg kg^{-1} , representing 63.40%~81.90% of total As concentrations in rice, which were much higher than shoot As concentrations. The fact that the glutinous rice had higher biomasses, higher tolerance, lower As concentrations in its root and shoot than the other two rice cultivars proved the glutinous more applicable to As polluted soils.

Key Words: cultivar; arsenic(As); hybrid rice; conventional rice; glutinous rice

基金项目:国家教育部 985 工程环境与污染控制科技创新平台资助项目

收稿日期:2007-11-06; 修订日期:2008-04-18

作者简介:刘志彦(1979~),女,河北正定县人,博士生,主要从事环境生态与湿地恢复研究. E-mail: liuzhiyan008@126.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chengui-zhu@yeah.net

致谢:感谢张仁铨教授对文章写作给予的帮助。

Foundation item: The project was financially supported by Education Ministry of China "985" Engineering of science and technology for environmental and pollution control.

Received date: 2007-11-06; **Accepted date:** 2008-04-18

Biography: LIU Zhi-Yan, Ph. D., mainly engaged in environment ecology and wetland rehabilitation. E-mail: liuzhiyan008@126.com

世界上许多地方,特别是在东南亚地区,水稻是最稳定的食物来源^[1]。水稻的食品安全问题一直以来备受学者们的关注。由于人类活动,大量的砷(As)被排放于环境中^[2,3]。目前,世界上有多个国家的土壤和地下水受到 As 污染的危害^[4]。在我国广东北部矿区,土壤受 As 等重金属污染严重。经测定,矿区附近农田土壤中 As 含量高达 344.11mg/kg,远远超出非污染土壤中的 As 含量 1~40mg/kg^[2]。水稻种植在 As 污染土壤中或用 As 污染水源灌溉后,大量的 As 会在其根部、稻草及谷粒中积累^[5~7]。受 As 污染的谷粒被人们食用后会在人体内累积,另外 As 还会通过“稻草-家畜-人体”的食物链途径危害人类健康^[7]。

有关不同品系水稻的研究主要集中于其农艺特性、生理生化特性等方面^[8~10]。不同水稻品系对外界逆境环境如不同淹涝程度、酸雨、病虫害等所表现出的抗性也不相同^[9,11]。尽管有研究表明不同水稻品种(基因型)对 As 的耐性与积累程度不同^[12~14],而不同水稻品系对 As 的吸收、转运及积累特性的相关研究并不多见。本文针对广东北部矿区 As 污染较为严重的特点,选用广东及华南地区较为常见的杂交稻、常规稻和糯稻 3 个水稻品系,通过琼脂水培模拟水稻厌氧的湿地环境,使之更接近水稻生长的实际环境^[15~17],从而研究不同水稻品系对 As 吸收、转运和积累规律,并为低积累、高耐性水稻品系(品种)的选择提供科学的理论依据。

1 材料和方法

1.1 实验材料

供试水稻品种为华南地区常见品种。包括两个杂交稻品种:优优 998 和五丰优 2168;两个常规稻品种:丰富占和黄丝占;两个糯稻品种:糯 GW 和黄壳糯。

1.2 实验方案

(1)将水稻种子用 30% H₂O₂ 浸泡 15min,用去离子水洗净,催芽后在潮湿的珍珠岩中培育 21d。

(2)配置不同 As 浓度的 0.1% 的琼脂溶液(Hogland 溶液)^[18]。大量元素(mmol/L)包括: NH₄NO₃, 5.0; K₂SO₄, 2.0; CaCl₂, 4.0; MgSO₄·7H₂O, 1.5; KH₂PO₄, 1.3。微量元素(μmol/L)包括: Fe(II)-EDTA, 50; H₃BO₄, 10; ZnSO₄·7H₂O, 1.0; CuSO₄·5H₂O, 1.0; MnSO₄·5H₂O, 5.0; Na₂MoO₄·2H₂O, 0.5; CoSO₄·7H₂O, 0.25。将大量元素(不包括 MgSO₄·7H₂O 与 KH₂PO₄)溶液中加入琼脂粉,浓度为 0.1%,煮沸 1h,其间用磁力搅拌器不断搅拌,待至室温时再加入 MgSO₄·7H₂O、KH₂PO₄与微量元素,并用 0.1M 的 KOH 或 HCl 将其 pH 调至 5.5,以防沉淀生成^[3,16],然后加入 Na₂HAsO₄·7H₂O,配成 As 浓度(以纯 As 计)梯度为 0.5,1.0,2.0,4.0 mg/L 的琼脂溶液,本文以 As0.5, As1.0, As2.0, As4.0 表示其浓度,并设置不加 As 的对照(CK),以 As0 表示。将配置好的琼脂溶液置于 PVC 盆(直径 10cm,高 13cm)中,每盆 500ml。

(3)选择生长一致、茁壮的水稻幼苗,将其移植于处理好的琼脂营养液中(移植时须小心不要破坏其根系),每盆 6 株,每个处理 4 个重复;每 7d 更换 1 次营养液,5 周后收获,测定水稻幼苗的生长指标;然后用超纯水洗净植物,将根部与地上部分开,在 65℃ 烘干至恒重,待分析。

1.3 指标及测定

1.3.1 生长指标的测定

在水稻幼苗移植前及收获后分别测量每盆水稻最长根的长度,计算其延长量。

称量根部及地上部的干重。

1.3.2 As 含量的测定

将烘干后的样品剪碎,称量后放入消化管中,加入 5ml 浓硝酸(超级纯),浸泡过夜;将温度升至 80℃ 消解 1h,然后在 120~130℃ 消解 24h;冷却后用超纯水定容;然后用原子荧光光度计(AFS-820,北京吉天仪器有限公司)测定消解溶液中 As 的浓度。为了进行质量控制,测试样品中包含空白和标准物质 GBW(0763)(地矿部物化探研究所)。

1.4 数据处理

(1)耐性指数(tolerance index, TI)

TI 反映水稻对 As 的耐性程度。用加 As 培养基质处理中水稻最长根的延长量与对照中水稻最长根的延

长度的比值表示^[19]。

$$TI = \frac{\text{growth in solution} + \text{As}}{\text{growth in solution} - \text{As}}$$

(2) 转移系数(translocation factor, *TF*)

TF 为水稻地上部 As 含量与根部 As 含量的比值,表示 As 由水稻根系转运至茎叶的能力^[20]。

(3) *SAU*

水稻根系对 As 的吸收能力,用 specific arsenic uptake(*SAU*)表示^[12] :

$$SAU = \frac{C_{\text{root-As}} \times \text{Root}_{\text{biomass}} + C_{\text{shoot-As}} \times \text{Shoot}_{\text{biomass}}}{\text{Root}_{\text{biomass}}}$$

式中,*C* 代表水稻中 As 含量。

实验数据采用 SAS8.0 及 Excel 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同 As 浓度对水稻幼苗生长的影响

2.1.1 供试水稻根部及地上部的生物量

方差分析结果表明,相同 As 浓度处理不同品系间根部干重差异不显著($P > 0.05$),除 As1.0 处理时杂交稻根部干重为 0.03g 外,其余均在 0.04 ~ 0.05g 范围内。不同 As 浓度处理各品系间根部干重差异也不显著($P > 0.05$),表明各水稻品系根部生物量受环境中 As 的抑制作用不明显(图 1),但也有可能由于处理时间较短,根部生物量较小所致。在 As 0 ~ 4.0 处理中杂交稻的地上部干重均是 3 个品系中最小的。在 As0、2.0、4.0 处理中糯稻的地上部干重均为最大。随 As 浓度增加,杂交稻地上部干重呈减小趋势($P > 0.05$)。常规稻在 As0.5 处理中比 As0 处理时增加,之后随 As 浓度的升高而减小($P < 0.05$)。糯稻的地上部干重随 As 浓度的升高而显著减小($P < 0.05$)(图 2)。

2.1.2 不同品系水稻对 As 的耐受程度

随 As 浓度的增加,常规稻与糯稻的耐性(用耐性指数 *TI* 表示)均随 As 浓度的增加呈极显著减小($P < 0.01$)。杂交稻的 *TI* 值在 As0.5 ~ 2.0 处理时随 As 浓度的升高而减小,然而在 As4.0 处理时比 As2.0 处理时增加($P < 0.05$)。在 As0.5 ~ 2.0 处理中糯稻的 *TI* 均显著高于其它两个品系,大小顺序均为:糯稻 > 常规稻 > 杂交稻。在 As4.0 处理中 *TI* 排序为:杂交稻 > 糯稻 > 常规稻(图 3)。

2.2 不同浓度 As 在供试水稻品系体内的积累

2.2.1 As 在供试水稻根部及地上部的积累

在 As0.5 ~ 2.0 处理中,As 在杂交稻根部的积累量均显著高于其它两个品系;在 As4.0 处理时糯稻的根部 As 含量最高,杂交稻则最低。杂交稻与常规稻根部 As 的积累量均随培养基质中 As 浓度的升高而增加($P < 0.01$)。糯稻在 As0.5 ~ 2.0 三个处理中根部 As 含量的变化似乎并不明显,在 As4.0 处理中升至最高值($P < 0.01$)(图 4)。在 As0.5 和 1.0 处理中,地上部 As 含量的排序均为杂交稻 > 常规稻 > 糯稻;在 As2.0 和 4.0 处理中排序分别为:常规稻 > 杂交稻 > 糯稻,杂交稻 > 糯稻 > 常规稻。3 个水稻品系地上部 As 含量均随培养基质中 As 浓度的升高极显著增加($P < 0.01$)(图 5)。总体看来,杂交稻的根部与地上部 As 的积累量较高,糯稻则较低。

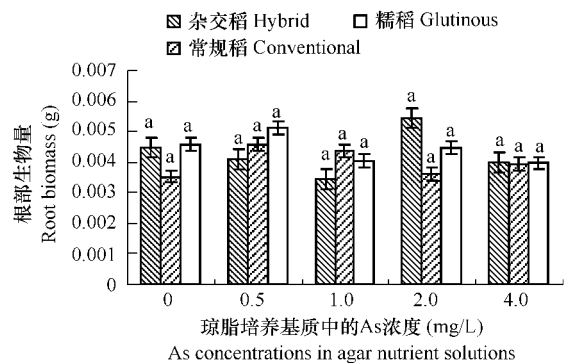


图 1 不同 As 浓度琼脂培养基质条件下供试水稻品系根部生物量

Fig. 1 Root biomass of rice cultivars growing in solutions with different As concentrations

图中误差线为标准误 SE; 字母为邓肯多重比较结果,字母不同者表示差异显著, $P < 0.05$; 下同 Error bars mean standard errors; Different letters in the same group indicate significant difference at $P < 0.05$ according to the Duncan's multiple range tests; the same below

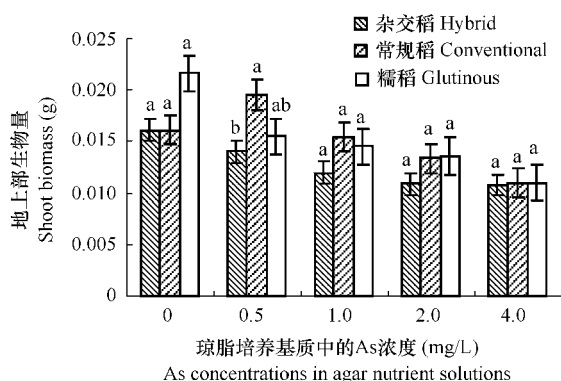


图2 不同 As 浓度琼脂培养基条件下供试水稻品系地上部生物量

Fig. 2 Shoot biomass of rice cultivars growing in solutions with different As concentrations

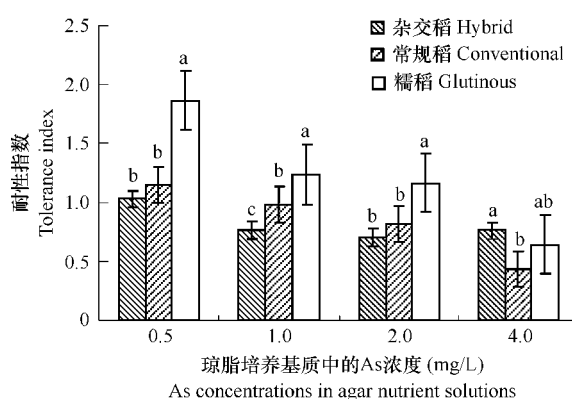


图3 不同 As 浓度琼脂培养基条件下供试水稻品系的耐性指数

Fig. 3 Tolerance indexes of rice cultivars growing in solutions with different As concentrations

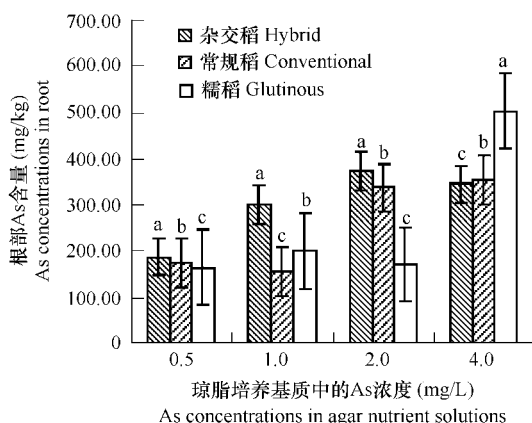


图4 不同 As 浓度琼脂培养基条件下供试水稻品系根部 As 含量

Fig. 4 As concentrations in root of rice cultivars growing in solutions with different As concentrations

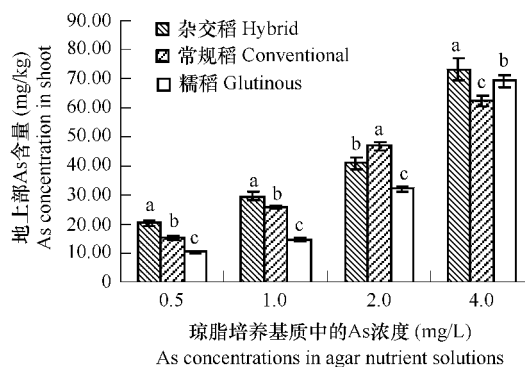


图5 不同 As 浓度琼脂培养基条件下供试水稻品系地上部 As 含量

Fig. 5 As concentrations in shoot of rice cultivars growing in solutions with different As concentrations

2.2.2 供试水稻根系对 As 的吸收能力

图6表明在As0.5与1.0处理中,杂交稻的SAU值均显著高于常规稻和糯稻,常规稻与糯稻差异不显著。在As2.0处理中,常规稻的SAU值最大,与杂交稻差异不显著,二者显著高于糯稻。在As4.0处理中,糯稻显著高于杂交稻与常规稻。随培养基中As浓度的升高,供试水稻品系的SAU值均极显著增大($P < 0.01$)。

2.3 As由供试水稻根部向地上部的转运

各水稻品系(品种)As由植物根系转运至地上部的能力(用转移系数 TF 表示),不同As浓度处理,3个水稻品系 TF 的大小变化规律性似乎并不明显。随As浓度的增加,3个水稻品系 TF 变化趋势也不相同。杂交稻在As0.5,1.0和2.0三个处理中 TF 值变化不大,最大值(As2.0处理)仅比最小值(As1.0处理)高0.022,在As4.0时 TF 显著增大($P < 0.01$)。常规稻的 TF 在不同As浓度处理时差异不显著($P > 0.05$)。糯稻的 TF 随As浓度的升高而显著减小($P < 0.01$)(图7)。

2.4 生物量,根部As含量,地上部As含量, TI , TF , SAU 的相关性分析

由表1可知水稻根部干重与地上部干重正相关性显著,说明根部生物量的积累对于地上部生物量的积累

有积极的促进作用。而地上部干重与根部和地上部 As 含量均呈极显著负相关关系,反映了根部和地上部 As 的累积对植物产生了毒性,并对水稻的生长产生了抑制作用。根部 As 含量与地上部 As 含量及 *TF* 均呈极显著正相关关系,说明 As 被根系吸收后向地上部的转移具有绝对性,根系对 As 积累量的大小是 *TF* 大小的决定因子,且二者决定了地上部 As 的积累量。供试水稻的 *TF* 与 *SAU* 与地上部生物量均呈负相关关系,同样反映了 As 对植物的毒性抑制了其干物质的积累。

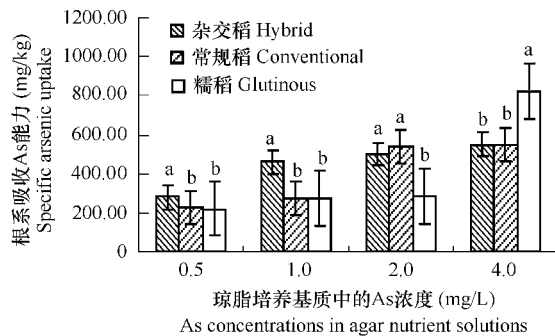


图6 不同 As 浓度琼脂培养基条件下供试水稻品系根系对 As 的吸收能力

Fig. 6 Specific arsenic uptake of rice cultivars growing in solutions with different As concentrations

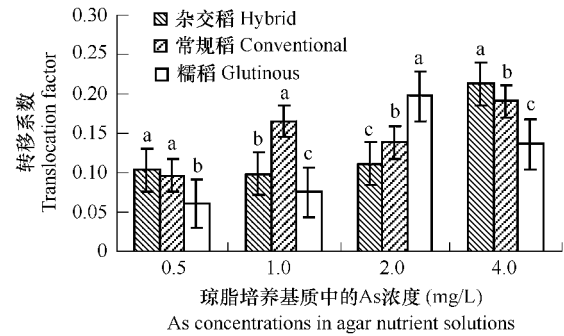


图7 不同 As 浓度琼脂培养基条件下供试水稻品系的转移系数

Fig. 7 Translocation factor of rice cultivars growing in solutions with different As concentrations

表1 供试水稻品种生物量, 根部与地上部 As 含量及 *TI*, *TF*, *SAU* 的泊松矩相关系数 ($n=30$)

Table 1 Person product-moment correlation matrix for biomass, As concentrations in root and shoot, and *TI*, *TF*, *SAU* of rice varieties ($n=30$)

项目 Item	地上部干重 Shoot DW	根部 As 含量 Root-As	地上部 As 含量 Shoot-As	耐性指数 <i>TI</i>	转移系数 <i>TF</i>	根系吸收 As 的能力 <i>SAU</i>
根部干重 Root DW	0.415 *	-0.014	-0.068	0.232	-0.008	-0.145
地上部干重 Shoot DW	-	-0.639 **	-0.603 **	-0.032	-0.445 *	-0.688 **
根部 As 含量 Root-As		-	0.827 **	0.238	0.532 **	0.963 **
地上部 As 含量 Shoot-As			-	0.036	0.774 **	0.868 **
耐性指数 <i>TI</i>				-	0.318	0.194
转移系数 <i>TF</i>					-	0.641 **

* 在 0.05 水平上相关性显著; ** 在 0.01 水平上相关性显著 correlation is significant at the 0.05 levels; ** correlation is significant at the 0.01 levels

3 讨论

3.1 As 对水稻生长的影响

供试水稻品系根部生物量的积累受 As 的影响作用不显著。在较高浓度 (As 1.0 ~ 4.0 mg/L) 时, As 对地上部干物质的积累起到了一定的抑制作用, 但效果不显著。低浓度的 As 并不一定对水稻造成毒性, 反而可以促进某些水稻品系 (品种) 的生长。结果表明常规稻在 As 0.5 基质中培养时其地上部的干重比 As 0 时增加。刘文菊等^[12]用 20 mol/L 的 As (V) 和含 As (III)、As (V) 各 10 M 的营养液, 对 6 种不同基因型的水稻 (6 周龄) 进行水培 2 周的实验。由于培养条件、培养时间、水稻品种等与本实验均不相同, 所得水稻的生物量较本文中水稻的生物量大。他们的结果认为: As 对根系生长均起到了促进作用, 却抑制了地上部的正常生长。这与本实验结果有一定相似之处。本实验结果还与有关文献研究的土培实验结果相似。如 Abedin 等^[5]用 As 含量为 0.2 ~ 8.0 mg/L 的 $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 溶液浇灌水稻, 结果显示随 As 浓度升高, 植株的高度受到抑制, 但茎叶的生物量并未显著减小。Tsutsumi^[21]将 As [V] 加入土壤中, 研究表明当土壤中 As 含量低于 125 mg/kg 时, 水稻生长的高度不会显著降低。但当 As 含量为 312.5 mg/kg 时, 植株高度减小了 63%。因此低剂量的 As 并不

一定对植物造成伤害,这可能与 As 本身的理化特性有关。由于 As 与磷是同族元素^[22],As 的还原作用可以提高植物细胞中氧化酶的活性,使不可给态磷有效化;另一方面 As 的毒性可以杀死或抑制危害植物的病菌,从而减少其对植物的危害,有利于植物的生长^[23];但当 As 浓度较高时会对植物产生毒害作用。

低浓度 As 对常规稻干物质积累的促进作用较杂交稻和糯稻的强。在较高 As 浓度基质中,3 个水稻品系的生长均受到显著抑制。糯稻对 As 的耐性(TI)最强,杂交稻最弱,常规稻居中。此结果与生物量积累结果一致:糯稻>常规稻>杂交稻。说明根系生长的强弱与干物质的积累关系密切。尽管杂交稻具有丰产、稳产、适应性广等优点,但本文结果表明杂交稻对 As 的耐性比常规稻和糯稻弱,其根长的生长受 As 的抑制作用较其它两个品系显著。

3.2 水稻对 As 的积累、转运特性

供试水稻品系根部及地上部 As 的积累量随培养基质中 As 浓度的升高总体上呈增加趋势,然而在某些 As 浓度处理时出现相反的现象,这可能主要由于不同 As 浓度处理时,As 从根部向地上部的转移系数 TF 不同所致。即根部和地上部 As 的积累量除了与环境中 As 的浓度密切相关外,水稻根系向地上部转运 As 的能力(TF)也起到了不可忽视的作用。

结果表明,水稻地上部与根部 As 的积累量呈极显著正相关关系,相关系数达 0.827(表 1)。然而,供试水稻品系根部 As 的积累量(156.31~504.03mg/kg,占水稻总 As 含量的 63.40%~81.90%),远远高于其地上部 As 的积累量(10.52~73.14mg/kg,占水稻总 As 含量的 18.10%~36.60%)。各水稻品系的 TF 值较小(0.043~0.275)。这可能由于根蛋白巯基与 As 结合将其沉淀于根中,阻碍其向地上部转移^[24]。因此,尽管根部对 As 具有较强的吸收与积累能力,但只有少量的 As 被转运至地上部分。刘文菊等人^[12]的实验结果中,根部 As 含量在 447~1010 mg/kg 范围内,而茎叶中 As 含量在 21.3~42.0mg/kg 范围内,根部 As 含量最低值是茎叶 As 含量最高值的 10 倍多。崔瑞平等^[24]的土培实验也得到相似的结论:用含 As 废水灌溉水稻田,分析测得水稻根部富集的 As 含量(163.96mg/kg)比地上部分多得多,根部 As 含量占各部位 As 含量总和的 96.5%。

As 在水稻体内积累的一般规律为根系>茎叶>谷壳>谷粒^[14,25]。已有研究表明尽管水稻种植在高 As 污染环境中,但是其谷粒中对 As 的积累却很少。例如 Abedin 等^[5]研究发现当 As 溶液浓度为 8mg/L 时根部 As 含量为 107.5mg/kg,谷粒中 As 含量仅为 0.15~0.42mg/kg,并未超过澳大利亚食品卫生标准 1.0 mg/kg^[26]。杜道灯等^[13]向土壤中加入 $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$,使 As 处理浓度为 0~200mg/kg 对水稻进行土培实验。结果表明糙米 As 含量随土壤中 As 浓度升高而增加,但增加的幅度很小,最高为 0.4mg/kg,未超过当时我国食品卫生标准 0.7mg/kg。有报道认为,当 As 污染稻田施足氮、磷、钾等肥料后,产量仅损失 10% 左右;并且如果 As 污染稻田肥料充足,而非污染稻田肥料不足时,As 污染土壤种植的水稻产量高出非污染土壤^[27]。

另外,与其它农作物相比,水稻对 As 的吸收与积累具有其独特性。杨居荣和葛家满^[28]向草甸褐土中加入 10~500mg/kg(以 As 计)的 $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和 Na_3AsO_3 ,研究 As 对水稻、春小麦、玉米、萝卜的污染效应。结果表明萝卜中的 As 含量已超出国家食品卫生标准。春小麦籽粒中 As 含量未超出国家食品卫生标准,根和茎叶对 As 的积累量都比较小。水稻根部对 As 的积累能力远远高于其它几种植物,但其籽粒中的 As 含量却很小,最高为 0.55mg/kg。Williams 等人^[6]检测分析发现,在 As 污染严重的孟加拉国,水稻谷粒中 As 含量在 0.18~0.31mg/kg 范围内,并未超过当地 As 在农作物中最高允许浓度 1.0 mg/kg。而海芋,茄子,黄瓜,佛手瓜,茼蒿,土豆,长豆角,萝卜叶,芋头,番木瓜中 As 的平均含量分别 1.93,1.59,1.17,1.06,0.98,0.89,0.87,0.79,0.69,0.69mg/kg,均超过当地 As 的食品卫生标准:根和块茎类蔬菜 0.79 mg/kg,果实类蔬菜 0.56mg/kg,叶子类蔬菜 0.39mg/kg。

综上所述,本研究中水稻对 As 的积累及转运特征可归结为以下两点:(1)根部对 As 的积累能力较强。(2)As 被根系吸收后大部分被固定于根部,只有很少量被转运至地上部分。与其他农作物相比,在中、低 As

污染土壤中,水稻是较宜种植的作物。进行种植时,需选择根部及地上部对 As 的积累量小,耐性强(*TI* 值高),但转运能力小(*TF* 值小)的水稻品系(品种)。就本文结果而言,在不同 As 浓度培养基质中,糯稻的生物量积累较其它两个品系高,其耐性指数较大,根部及地上部对 As 的积累量较小,且转运系数(*TF*)及对 As 的吸收能力(*SAU*)均较小。因此,在 As 污染农田土壤中,糯稻比其它两个品系的水稻更加适合进行推广种植,其次是常规稻。尽管杂交稻具有抗病、抗倒伏,高产、稳产等特性,但由于其对 As 具有较强的吸收、积累能力,应尽可能避免在含 As 浓度较高的农田土壤中种植。

References:

- [1] Abedin M J, Feldmann J, Meharg A A. Uptake kinetics of arsenic species in rice plants. *Plant Physiology*, 2002, 128(3): 1120—1128.
- [2] Mandal B K, Suzuki K T. Arsenic round the world: a review. *Talanta*, 2002, 58(1): 201—235.
- [3] Liu W J, Zhu Y G, Smith F A, *et al.* Do iron plaque and genotypes affect arsenate uptake and translocation by rice seedlings (*Oryza sativa* L.) grown in solution culture. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55(403): 1707—1713.
- [4] Gonzaga M I S, Santos J A G, Ma L Q. Arsenic chemistry in the rhizosphere of *Pteris vittata* L. and *Nephrolepis exaltata* L. *Environmental Pollution*, 2006, 143(2): 254—260.
- [5] Abedin M J, Cresser M S, Meharg A A, *et al.* Arsenic accumulation and metabolism in rice (*Oryza sativa* L.) *Environmental Science and Technology*, 2002, 36(5): 962—968.
- [6] 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 groundwaters. *Environmental Science and Technology*, 2006, 40(16): 4903—4908.
- [7] Xie Z M, Huang C Y. Control of arsenic toxicity in rice plants grown on an arsenic-polluted paddy soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1998, 29(15): 2471—2477.
- [8] Wang J L, Xu Z J, Ma D R. Comparison on grain filling characters between hybrid and conventional rice in northern China. *Chinese Journal of Rice Science*, 2004, 18(5): 425—430.
- [9] Chen Y H, Zhao S, Yan Q Q, *et al.* Effect of different submergence stress on agronomic traits and biochemical characteristics in hybrid and traditional rice. *Chinese Journal of Rice Science*, 2006, 20(5): 512—516.
- [10] Liu Y F, Xiao L T, Tong J H, *et al.* Comparative studies on vascular bundles of flag leaf in super hybrid rice and conventional rice. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(7): 151—155.
- [11] Li H S, Nie C R, Hu Y G. Effects of simulated acid rain on hybrid, common and wild rice varieties. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(2): 284—287.
- [12] Liu W J, Hu Y, Bi S Q, *et al.* Study of genotypic differences on arsenic uptake by and translocation in rice seedlings. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(6): 356—360.
- [13] Du D D, Li Y X, Dai B Q, *et al.* Effect of As to rice growth and its residual in rice. *Environmental Science and Technology*, 1987, (3): 11—13.
- [14] Liu W J, Zhu Y G, Hu Y, *et al.* Arsenic sequestration in iron plaque, its accumulation and speciation in mature rice plants (*Oryza sativa* L.). *Environmental Science and Technology*, 2006, 40(18): 5730—5736.
- [15] Wiengweera A, Greenway H, Thomson C J. The use of agar nutrient solution to simulate lack of convection in waterlogged soils. *Annals of Botany*, 1997, 80(2): 115—123.
- [16] Colmer T D, Gibberd M R, Wiengweera A, *et al.* The barrier to radial oxygen loss from roots of rice (*Oryza sativa* L.) is induced by growth in stagnant solution. *Journal of Experimental Botany*, 1998, 49(325): 1431—1436.
- [17] Armstrong W. Radial oxygen losses from intact rice roots as affected by distance from the apex, respiration and waterlogging. *Physiologia Plantarum*, 1971, 25: 192—197.
- [18] Hewitt E J. Sand and water culture methods used in the study of plant nutrition, 2nd edn. Technical Communication No. 22. Commonwealth Bureau of Horticulture and Plantation Crops. The Eastern Press, 1966.
- [19] Wilkins D A. The measurement of tolerance to edaphic factors by means of root growth. *New Phytologist*, 1978, 80: 623—633.
- [20] Stoltz E, Greger M. Accumulation properties of As, Cd, Cu, Pb and Zn by four wetland plant species growing on submerged mine tailing. *Environmental and Experimental Botany*, 2002, 47(3): 271—280.
- [21] Tsutsumi M. Intensification of arsenic toxicity to paddy rice by hydrogen sulphide and ferrous iron I. Induction of bronzing and iron accumulation in rice by arsenic. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1980, 26: 561—569.

- [22] Meharg A A, Macnair M R. Suppression of the high affinity phosphate uptake system: a mechanism of arsenate tolerance in *Holcus Lanatus* L. *Journal of Experimental Botany*, 1992, 43(249): 519—524.
- [23] Zhang G X, Yang J R, Hua L. Arsenic in soil condition and the ecological effect. *Soil*, 1996, 28(2): 64—68.
- [24] Cui R P. Study of Arsenic distribution in different part of rice. *Guizhou Environmental protection Science and Technology*, 1995, 1(1): 31—32.
- [25] Tang L J, Li X D, Liu J H, *et al.* Effect of arsenic on growth development of rice and residual rules in the loam paddy soil. *Journal of Jilin Agricultural University*, 1996, 18(3): 58—61.
- [26] National Food Authority. Australian Food standard Code; Australian Government Publication Service; Canberra. March, 1993.
- [27] Shao H C, Chen J Y, Shen D F. Effect of As contamination to rice and transform measurements. *Shanghai Agricultural Science and Technology*, 2002, (1): 81.
- [28] Yang J Y, Ge J M. Studies on the effects of arsenic on farmland ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 1984, 4(1): 34—45.

参考文献:

- [8] 王建林, 徐正进, 马殿荣. 北方杂交稻与常规稻籽粒灌浆特性的比较. *中国水稻科学*, 2004, 18(5): 425~430.
- [9] 陈永华, 赵森, 严钦泉, 等. 不同淹涝胁迫强度对杂交稻和常规稻农艺性状和生化特性的影响. *中国水稻科学*, 2006, 20(5): 512~516.
- [10] 刘宇峰, 萧浪涛, 童建华, 等. 超级杂交稻与常规稻剑叶维管组织结构比较研究. *中国农学通报*, 2007, 23(7): 151~155.
- [11] 黎华寿, 聂呈荣, 胡永刚. 模拟酸雨对杂交稻常规稻野生稻影响的研究. *农业环境科学学报*, 2004, 23(2): 284~287.
- [12] 刘文菊, 胡莹, 毕淑芹, 等. 苗期水稻吸收和转运砷的基因型差异研究. *中国农学通报*, 2006, 22(6): 356~360.
- [13] 杜道灯, 李应学, 戴碧琼, 等. 砷对水稻生长和残留影响的实验研究. *环境科学与技术*, 1987, (3): 11~13.
- [23] 张国祥, 杨居荣, 华璐. 土壤环境中的砷及其生态效应. *土壤*, 1996, 28(2): 64~68.
- [24] 崔瑞平. 砷(As)在整株水稻根部位的分布研究. *贵州环保科技*, 1995, 1(1): 31~32.
- [27] 邵汉池, 陈俊义, 沈丹锋. 砷污染对水稻的影响及其转化措施. *上海农业科技*, 2002, 1: 81.
- [28] 杨居荣, 葛家满. 砷对农田生态系统污染效应的实验研究. *生态学报*, 1984, 4(1): 34~45.