

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

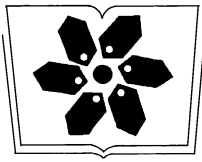
Acta Ecologica Sinica



第34卷 第4期 Vol.34 No.4 **2014**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 34 卷 第 4 期

2014 年 2 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 富营养化湖泊溶解性有机碳生物可利用性研究进展 叶琳琳,孔繁翔,史小丽,等 (779)
- 黄河下游平原农业景观中非农生境植物多样性 卢训令,梁国付,汤茜,等 (789)

个体与基础生态

- 锰胁迫对杠板归细胞超微结构的影响 王钧,邬卉,薛生国,等 (798)
- 不同渗氧能力水稻品种对砷的耐性和积累 吴川,莫竞瑜,薛生国,等 (807)
- 弱光下水分胁迫对不同产地披针叶茴香幼苗生理特性的影响 曹永慧,周本智,陈双林 (814)
- 不同分枝数对桑树幼苗生长发育的影响 邹慧慧,胥晓,刘刚,等 (823)
- 斑膜合垫盲蝽若虫在国槐上的空间分布型及抽样技术 朱惠英,沈平,吴建华,等 (832)
- 连作苹果园土壤真菌的 T-RFLP 分析 尹承苗,王功帅,李园园,等 (837)
- 棉隆对苹果连作土壤微生物及平邑甜茶幼苗生长的影响 刘恩太,李园园,胡艳丽,等 (847)
- 两株具有芪降解功能的植物内生细菌的分离筛选及其特性 孙凯,刘娟,李欣,等 (853)

种群、群落和生态系统

- 温度对柑橘始叶螨实验种群生长发育繁殖的影响 李迎洁,王梓英,张国豪,等 (862)
- 高原鼠兔有效洞穴密度对青藏高原高寒草甸群落植物生态位的影响 贾婷婷,毛亮,郭正刚 (869)
- 三工河流域琵琶柴群落特征与土壤因子的相关分析 赵学春,来利明,朱林海,等 (878)
- 岷江干旱河谷造林对土壤微生物群落结构的影响 王卫霞,罗达,史作民,等 (890)
- 滩涂围垦和土地利用对土壤微生物群落的影响 林黎,崔军,陈学萍,等 (899)
- 福寿螺对稻田水生植物群落结构的影响 赵本良,章家恩,戴晓燕,等 (907)
- 4 种木本植物在潜流人工湿地环境下的适应性与去污效果 陈永华,吴晓芙,郝君,等 (916)
- 基于静态箱式法和生物量评估海北金露梅灌丛草甸碳收支 李红琴,李英年,张法伟,等 (925)
- 初始 pH 值对碱性和酸性水稻土微生物铁还原过程的影响 吴超,曲东,刘浩 (933)

景观、区域和全球生态

- 库姆塔格柽柳沙包年层稳定碳同位素与气候环境变化 张锦春,姚拓,刘长仲,等 (943)

资源与产业生态

- 大棚甜瓜蒸腾规律及其影响因子 张大龙,常毅博,李建明,等 (953)
- 盐胁迫下荒漠共生植物红砂与珍珠的根茎叶中离子吸收与分配特征 赵昕,杨小菊,石勇,等 (963)
- 普通鹿蹄草品质与根际和非根际土壤的关系 耿增超,孟令军,刘建军 (973)

作物种植前后土壤有机质及养分因子的空间变异分析 方 斌,吴金凤 (983)

城乡与社会生态

城市河流健康评价指标体系构建及其应用 邓晓军,许有鹏,翟禄新,等 (993)

西藏生态足迹与承载力动态分析..... 安宝晟,程国栋 (1002)

研究简报

三峡库区岸坡消落带草地、弃耕地和耕地土壤微生物及酶活性特征 马 朋,李昌晓,雷 明,等 (1010)

盐胁迫对 2 种栎树苗期生长和根系生长发育的影响..... 王树凤,胡韵雪,孙海菁,等 (1021)

恒温 and 变温驯化对大蟾蜍蝌蚪热耐受性的影响 王立志 (1030)

学术信息与动态

国际生物土壤结皮研究发展态势文献计量分析..... 贺郝钰,侯春梅,迟秀丽,等 (1035)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 264 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 30 * 2014-02



封面图说: 大蟾蜍蝌蚪群——大蟾蜍别名癞蛤蟆,体长达 10cm 以上,身体肥胖,四肢短,步态及齐足跳的姿势具特征性。其背部皮肤厚而干燥,通常有疣,呈黑绿色,常有褐色花斑,趾间具蹼。毒腺在背部的疣内,受惊后毒腺分泌或射出毒液。大蟾蜍早春在水中繁殖,可迁移至 1.5km 外或更远的适合繁殖的池塘,产卵量很大,产卵数天后蝌蚪即可孵出,1—3 个月后发育为蟾。大蟾蜍常作为实验动物或药用动物,其耳后腺和皮肤腺的白色分泌物可制成“蟾酥”,可治疗多种疾病。研究表明,大蟾蜍蝌蚪最高逃避温度和最高致死温度比最适温度产生的影响要大。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@ 163.com

DOI: 10.5846/stxb201306121677

吴川, 莫竞瑜, 薛生国, 罗超睿. 不同渗氧能力水稻品种对砷的耐性和积累. 生态学报, 2014, 34(4): 807-813.

Wu C, Mo J Y, Xue S G, Luo C R. Characteristics of arsenic (As) tolerance and accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) genotypes with different radial oxygen loss. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(4): 807-813.

不同渗氧能力水稻品种对砷的耐性和积累

吴 川, 莫竞瑜, 薛生国*, 罗超睿

(中南大学冶金与环境学院, 国家重金属污染防治工程技术研究中心, 长沙 410083)

摘要: 水稻是目前世界上(尤其是东南亚)最主要的粮食作物之一,也是砷(As)通过食物链进入人体的主要途径。日益加剧的土壤砷污染,严重影响了稻米的产量和品质,进而威胁着人体健康。通过温室实验,研究 CNT 87059-3、玉香油占和巴西陆稻 3 种不同渗氧能力的水稻品种在不同砷浓度处理下的生长情况和砷积累特征,结果表明:(1)渗氧能力强的玉香油占砷耐性指数最高,砷处理浓度为 2 mg/L 时耐性指数高达 0.71,而 CNT 87059-3 的耐性指数为 0.55,巴西陆稻仅有 0.17;(2)随着砷处理浓度的升高,3 种水稻品种的生物量呈现下降趋势,但渗氧能力强的玉香油占较其它两品种生物量的下降幅度小;(3)在不同砷浓度处理下水稻地下部分的砷含量有显著性差异($P<0.001$),且同种砷浓度处理下不同水稻品种的地下部分砷含量也存在显著性差异($P<0.01$),渗氧能力较强的水稻品种与渗氧能力较弱的品种相比能显著降低砷在根部(地下部分)的积累。水稻渗氧能力与其砷耐性和砷积累有显著相关性,渗氧能力越强,水稻的砷耐性越强,砷的积累量越少。因此,通过筛选渗氧能力强的水稻品种,有望降低污染农田水稻的砷含量和健康风险。

关键词: 砷;水稻;渗氧;耐性;积累

Characteristics of arsenic (As) tolerance and accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) genotypes with different radial oxygen loss

WU Chuan, MO Jingyu, XUE Shengguo*, LUO Chaorui

School of Metallurgy and Environment, National Engineering Research Center for Control and Treatment of Heavy-Metal Pollution, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract: Rice is currently one of the most important foods in the world (especially Southeast Asia), but arsenic (As) contamination of rice is one of the main pollution pathways into the human food chain. Arsenic contamination of rice not only affects its yield and quality, but also threatens human health. There is an urgent requirement to understand the mechanisms of As tolerance and uptake by rice. In roots, oxygen is required for respiration in order to provide sufficient energy for growth, maintenance and nutrient uptake. However, significant amounts of oxygen loss through the root apex, (with up to 30%—40% of the oxygen being supplied via the root aerenchyma) to the soil is a process termed as radial oxygen loss (ROL). ROL occurs in the aerated rhizosphere of plant roots growing in waterlogged soil and results in significant changes in soil chemistry within the rhizosphere. Previous studies have shown that ROL was related to As accumulation and speciation, with total ROL from the root system being positively correlated with metal tolerance and negatively correlated with total and inorganic As in rice grains from 20 different genotypes. This paper assesses As tolerance and accumulation in three genotypes namely, CNT 87059-3, IAPAR9 and Yuxiangyouzhan; each possessing different ROL under different As treatments.

Experimental results showed that: (1) Root length was significantly different between the three genotypes (<0.05),

基金项目:国家公益性(环保)行业科研资助项目(201109056);国家自然科学基金资助项目(41201493)

收稿日期:2013-06-12; 修订日期:2013-10-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sgxue@csu.edu.cn

(2) Yuxiangyouzhan had the highest ROL and the greatest tolerance index (0.71) when exposed to 2 mg/L As, (3) the tolerance indices of the three genotypes decreased with increasing As concentration, (4) shoot and root biomass were significantly different between the three genotypes and treatments ($P < 0.05$) and (5) arsenic concentrations in roots were significantly different between the three genotypes ($P < 0.01$) (IAPAR with higher ROL, 336 mg/kg, CNT 87059-3 with lower ROL, 660 mg/kg), but not significantly different in shoots ($P > 0.05$). It is concluded that ROL is significantly correlated with As tolerance and accumulation. Rice cultivars with higher ROL have greater As tolerance and lower accumulation. Therefore, ROL can be a potential selection criterion for selecting suitable rice cultivars to grow in areas of high As contamination. This study provides significant findings regarding As tolerance in rice related to ROL and provides potential strategies to mitigate the health risk posed by As contamination. However, the mechanism for As tolerance and accumulation, as well as field application for mitigating As accumulation in rice grains needs further investigation.

Key Words: arsenic; rice; radial oxygen loss; tolerance; accumulation

土壤的砷污染问题近年来引发了国内外科研工作者的关注^[1-2]。国内的很多水稻种植地区跟矿产开采地区很近,直接导致了水稻土的 As 污染^[3-4]。水稻(*Oryza sativa* L.)是世界第二、我国第一大粮食作物,是世界近 30 亿人的主要粮食作物,我国水稻种植面积近 3200 万 hm^2 。近年水稻砷污染事件特别是砷毒性诱发癌症的现象被频频报道,引起了全世界广泛的关注^[3-4]。Liao 等^[5]发现在湖南郴州砷污染稻田上生长的稻米砷含量高达 7.5 mg/kg,远超出我国大米的食品卫生标准(0.2 mg/kg)。对以大米为主要食物的人群来讲,水稻砷(As)污染是人体暴露砷的重要途径^[3]。

清除受污染农田的砷,减少和控制水稻砷的积累及提高水稻的砷耐性等问题日益受到人们的重视。针对大面积的中低砷污染水稻田,物理、化学的修复方法操作简便,但其成本较高,难以大规模应用;而生物修复法基本停留在室内和田间示范阶段。通过筛选和培育对砷高耐性、低积累的水稻品种,以达到稳产和食品安全的目的被认为是目前最为经济有效的解决途径之一。国内外对不同(基因型)水稻品种砷吸收和积累做了大量的研究,发现不同水稻品种之间对砷的吸收和积累存在着显著差异^[6-7]。

水稻根部被认为由先天(遗传)因素所决定形成通气组织,以适应淹水的环境^[8-10];通气组织及不定根的形成有利于 O_2 输送到根部,这些氧除了满足根部的有氧呼吸之外,其中的一部分会渗到根际土壤中,即所谓渗氧(ROL),不同的水稻品种间的渗氧率存在明显的差异^[11-13]。湿地植物根系渗氧能力与其对重金属的耐性和积累有关^[10,14-15]。水稻地上部分

砷积累和水稻的渗氧能力成反比,水稻谷粒无机砷(无机砷被认为比有机砷对人体有更大的毒性^[16])积累也跟水稻的渗氧能力成反比^[17-18]。因此,通过分析水稻渗氧能力,有望筛选砷低积累的水稻品种。本文拟选择 CNT 87059-3、玉香油占和巴西陆稻等 3 种水稻,开展不同渗氧能力水稻品种的砷耐性和积累特征进行研究,以期筛选砷低积累的水稻品种,降低污染农田水稻的砷含量和健康风险。

1 材料与方法

1.1 实验材料

本研究采用的水稻品种有 3 种: CNT 87059-3 (来自中国水稻研究所)、玉香油占和巴西陆稻(来自广东水稻研究所),这 3 种水稻的渗氧能力差异较大^[18]。表 1 列出了 3 种水稻品种的相关信息。

1.2 温室试验

植株采用 Hoagland 营养液在人工温室内进行培养。首先将水稻种子用 20% 的 H_2O_2 浸泡 20 分钟后用去离子水洗净,然后播种于湿的灭菌沙土中,萌发后将幼苗移至 Hoagland 营养液中预培养 15 d,等幼苗长至 10—20 cm 高时选择大小一致的幼苗进行含砷 Hoagland 营养液处理。砷以 $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 的形式加入至营养液(用 0.1 mol/L NaOH 和 0.1 mol/L HCl 调节 pH 值至 5.8)中,依次设置营养液中砷浓度为 0, 2, 4, 8 mg/L,每种砷浓度至少做 3 次重复。

温室培养环境为:白天 25℃,晚上 20℃,相对湿度 70%—75%,光照 14 h,光照强度为 3000 lx。营养液保持白天连续通气 12 h,由于吸收和蒸发会导致营养液的减少,每天要以蒸馏水进行补偿,每 4 天更

表 1 3 种水稻品种的渗氧能力^[18]
Table 1 The characteristics of three different rice genotypes^[18]

品种 Genotypes	亚种 Subspecies	类型 Types	来源地 Origin	孔隙度 Porosity/%	渗氧 ROL /($\mu\text{molO}_2 \cdot \text{株}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)
CNT 87059-3	籼稻	水稻	泰国	18.88±1.5	7.0±0.05
玉香油占 Yuxiangyouzhan	籼稻	水稻	中国	28.21±3.8	17.5±3.1
巴西陆稻 IAPAR9	粳稻	旱稻	巴西	19.07±5.0	14.7±0.6

换 1 次营养液。

培养 30 d 后收获植物。收获的植物样品先用流动的自来水冲洗 10 min,再用去离子水冲洗 3 次,用吸水纸擦干植物表面的水分,将水稻植株分为地上和地下两部分。先量取植株根的长度后,再放入烘箱内 30 min(烘箱温度调至 105℃)。然后在 75℃ 环境下烘 48 h 至恒重,测定烘干后的植物样品各部分的质量,再用粉碎机将植物样品磨碎并过 60 目筛备用。

1.3 植物耐性指数测定

根据 Ye 等^[19]的相关报道,本研究中水稻砷耐性指数计算如下:

$$\text{砷耐性指数} = \frac{\text{砷处理的水稻根长}}{\text{未经砷处理的的水稻根长}} \times 100\%$$

1.4 植物样品分析

称取烘干植物样品(约 0.1 g),采用湿法消化(10 mL 浓 HNO_3 , 120℃)进行预处理,用电感耦合等离子体质谱(Elan9000; PerkinElmer, 美国)来测定消化后的水稻根以及地上部分的总砷含量^[20]。

1.5 数据处理

实验数据采用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS13.0 分析。

2 结果与分析

2.1 不同渗氧能力水稻品种的砷耐性

3 种水稻品种根系长度随砷处理浓度的增加显著变短(图 1),不同水稻品种的根长存在显著性差异($P<0.05$)。不加砷处理时,巴西陆稻的根系最长,可达 28.58 cm, CNT 87059-3 次之,为 14.75 cm,玉香油占最小为 13.37 cm。砷处理 30 d 后,3 个品种的水稻根系长度都有不同程度的减小。在 2 mg/L 的砷处理条件下,巴西陆稻的根系长度为 4.95 cm, CNT 87059-3 和玉香油占的根长分别为 8.07、9.45 cm。

随着砷处理浓度的继续升高,巴西陆稻的根长显著变短。当生长介质砷浓度为 8 mg/L 时,水稻根

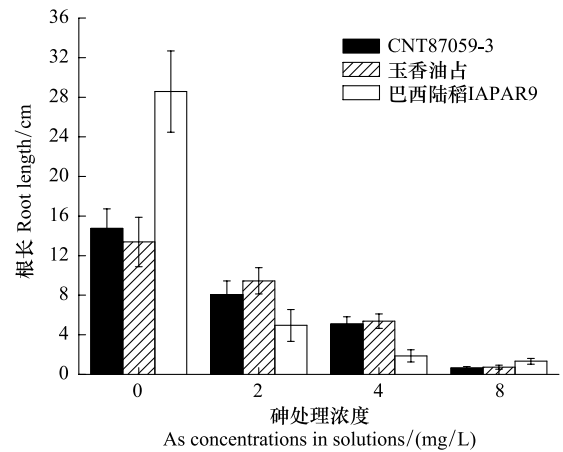


图 1 不同品种水稻在不同浓度砷处理下的根长对比
Fig.1 Root growth of three different genotypes of rice under different arsenic treatments

系长度为 1.33 cm,而 CNT 87059-3 和玉香油占的根长则分别为 0.65 cm、0.73 cm。在砷处理浓度从 0 升高至 8 mg/L 的过程中,巴西陆稻的根系长度减小幅度最大,而玉香油占根系长度变化相对较小。

在相同的砷浓度处理下,玉香油占的砷耐性指数最高。当砷处理浓度为 2 mg/L 时,其耐性指数可达 0.7065,而相同处理下巴西陆稻的耐性指数最低,只有 0.1732, CNT 87059-3 则为 0.5475(表 2)。随着砷处理浓度的增加,3 种水稻品种的砷耐性指数均有所下降,当砷浓度达到 8 mg/L 时,玉香油占的耐性指数为 0.05483, CNT 87059-3 的耐性指数为 0.04409,巴西陆稻则是 0.0466。尽管随着砷浓度增加,3 种水稻的砷耐性指数均有所下降,但玉香油占

表 2 不同水稻品种在不同砷浓度处理下的耐性指数
Table 2 Arsenic tolerance index of three rice genotypes exposed to different arsenic concentrations

品种 Genotypes	砷处理浓度 As treatments/(mg/L)		
	2	4	8
CNT 87059-3	0.5475	0.3458	0.0441
玉香油占 Yuxiangyouzhan	0.7065	0.4019	0.0548
巴西陆稻 IAPAR9	0.1732	0.0653	0.0467

在 3 种不同砷浓度处理下的耐性指数比其它两个品种均较大,这说明水稻的砷耐性可能与水稻品种本身性质有关。

2.2 不同渗氧能力水稻品种的生物量

砷处理 30 d 后,3 种水稻品种的根系和地上部分生物量降低(表 3)。不同砷处理浓度均对水稻生物量有显著影响($P<0.05$),不同水稻品种的生物量也存在显著性差异($P<0.05$)。在对照条件(不施加砷)下,CNT 87059-3 的地上部分和根系生物量最高,巴西陆稻次之,玉香油占最小。随着砷处理浓度的升高,3 种水稻品种的生物量均呈下降趋势。当生长介质砷浓度为 8 mg/L 时,玉香油占的地下部分生物量最高,为 0.022 mg/kg,较对照降低 48.84%;CNT

87059-3 的地下部分生物量最低,为 0.014 mg/kg,降低了 73.08%;巴西陆稻则是 0.015 mg/kg,降低 70.00%。植物的地上部分所受影响更为明显。受影响最大的为 CNT 87059-3,其地上部分生物量随砷处理浓度增加而显著减少,当砷处理浓度大于 4 mg/L 时,其地上部分生物量降低 98.64%,而玉香油占和巴西陆稻的生物量分别降低 46.08% 和 56.36%

在砷处理条件下,3 个水稻品种生物量减少比例大小顺序为:玉香油占<巴西陆稻<CNT 87059-3,表明渗氧能力较强的水稻品种(玉香油占)砷的耐性较强,渗氧能力较弱的水稻品种(CNT 87059-3)砷的耐性较差。

表 3 不同水稻品种在不同砷浓度处理下的生物量

Table 3 Shoot and root biomass of three rice genotypes exposed to different arsenic concentrations for 30 days

砷处理浓度 As treatments/ (mg/L)	地下部分生物量/(g/株) Root Biomass			地上部分生物量/(g/株) Shoot Biomass		
	CNT 87059-3	玉香油占 Yuxiangyouzhan	巴西陆稻 IAPAR9	CNT 87059-3	玉香油占 Yuxiangyouzhan	巴西陆稻 IAPAR9
0	0.052±0.007	0.043±0.005	0.050±0.009	0.110±0.014	0.102±0.015	0.110±0.020
2	0.033±0.003	0.031±0.007	0.016±0.001	0.061±0.008	0.075±0.014	0.040±0.005
4	0.029±0.060	0.026±0.003	0.020±0.007	0.002±0.007	0.055±0.004	0.048±0.019
8	0.014±0.001	0.022±0.004	0.015±0.001	0.001±0.003	0.014±0.001	0.043±0.003
方差分析 Analysis of variance						
水稻品种 (G)	$P<0.05$			$P<0.001$		
砷处理 (A)	$P<0.001$			$P<0.01$		
G×A	$P<0.05$			$P<0.001$		

表中数值为平均值 ± 标准方差 ($n=3$)

2.3 不同渗氧能力水稻品种的砷积累

由表 2 和表 3 可知,渗氧能力越强的水稻品种对砷的耐性就越强。为了进一步分析渗氧能力与砷吸收的关系,结合水稻品种(粳稻、籼稻)类型,选取巴西陆稻以及 CNT 87059-3 两个品种的水稻进行地上和地下部分砷含量的比较。结果(表 4)表明,水稻地下部分和地上部分砷含量在不同砷浓度处理下均有显著性差异($P<0.001$),同种砷浓度处理下不同水稻品种的地下部分砷含量也存在显著性差异($P<0.01$),但不同水稻品种在同种砷浓度处理下的地上部分砷含量并没有显著性差异($P>0.05$)。在砷含量达到 8 mg/L 之时,渗氧能力较弱的 CNT 87059-3 的地下部分砷含量可达 660 mg/kg,显著高于渗氧能力较强的巴西陆稻的 336 mg/kg。

3 讨论

本研究发现,砷处理明显抑制了水稻的生长,2—8 mg/L 砷浓度处理后水稻的根长和生物量较对照组相比显著降低($P<0.05$)。同样的现象在其他研究中也有发现,如 0.8 mg/L 砷处理^[21]和 1—8 mg/L 砷处理^[22]显著降低了水稻的生物量和植株高度。然而,刘志彦等^[8]研究了砷对水稻品系幼苗生长的影响,发现不同浓度(0—4 mg/L)的砷对供试水稻品系根部生物量无显著影响($P>0.05$),且低剂量的砷(0.5 mg/L)促进了供试常规稻的生长,这可能与砷处理浓度和供试水稻品种相关。

对于同一品种的水稻,不同器官的砷积累量差异较大,其中以根的积累能力最强,且一般以根>茎>叶>籽粒(或糙米)的顺序递减^[18,22]。刘志彦等^[8]研

表 4 不同砷浓度处理 30 d 后的水稻砷含量

Table 4 Arsenic concentrations of shoots and roots of three rice genotypes exposed to different arsenic concentrations for 30 days

砷处理浓度/(mg/L) As treatments	地下部分砷含量/(mg/kg) As concentrations in roots		地上部分砷含量/(mg/kg) As concentrations in shoots	
	CNT 87059-3	巴西陆稻 IAPAR9	CNT 87059-3	巴西陆稻 IAPAR9
0	1.84±1.39	3.75±0.55	0.36±0.17	0.32±0.17
2	279±43.0	88.4±24.4	3.38±1.65	2.43±0.67
4	229±57.9	218±34.3	7.16±2.83	7.70±2.26
8	660±233	336±135	18.1±8.85	23.8±7.17
方差分析 Analysis of variance				
水稻品种 (G)	$P<0.01$		NS	
砷处理 (A)	$P<0.001$		$P<0.001$	
G×A	$P<0.05$		NS	

表中数值为平均值 ± 标准方差 ($n=3$); NS 代表差异显著性未达到 $P=0.05$ 水平

究发现水稻地上部分的砷积累量随基质中砷浓度的升高总体呈增加趋势,水稻根部砷的积累量为 156.31—504.03 mg/kg, 占总砷含量的 63.40%—81.90%, 远远高于其地上部分的砷积累量。这与本研究水稻地下部分砷积累量 (88.4—660 mg/kg) 显著高于地上部分 (3.43—23.8 mg/kg) 的结果类似, 表明水稻吸收的砷主要积累在植物根系。国内外学者对不同 (基因型) 水稻品种砷吸收和积累研究发现, 即使生长于同一砷污染条件下, 不同水稻品种的砷吸收和积累也存在着显著差异^[7]。本研究发现三种不同渗氧能力的水稻品种地下部分对砷的积累有显著性差异 ($P<0.01$), 且渗氧能力较高的水稻品种对砷的吸收较低, 表明可通过测定水稻的渗氧能力来筛选适宜的水稻品种以降低稻米的砷积累量。

湿地植物对淹水环境的适应与根系的通气能力有关^[23-24]。植物体内氧的运输系统——通气组织的发展是最为重要的, 这个系统一方面提供根呼吸所需要的氧, 另一方面通过渗氧而氧化根际环境^[11-12]。渗氧的发生会氧化浸水土壤中的植物根际, 导致根际土壤化学性质的明显变化, 导致根际土壤中毒性元素的沉降, 影响重金属在土壤中的生物有效性等^[25]。Liu 等^[14]发现 3 种红树植物 (*Aegiceras corniculatum*, *Avicennia marina* 和 *Bruguiera gymnorrhiza*) 的重金属耐性与其渗氧能力存在显著正相关性。Deng 等^[9]也发现在 10 种湿地植物的渗氧量与其对 Fe/Zn 的耐性显著相关。Wu 和 Mei 等^[11,17]研究了多种水稻品种, 发现其地上部分对砷的积累与渗氧呈负相关。但之前的研究都集中在单一土壤培养条件下, 本研究发现渗氧能力较强的水稻品种比渗氧能力弱的水

稻品种有较高的耐性指数, 且地下部分对砷的积累也较低, 进一步验证了渗氧与植物重金属耐性的相关性。

渗氧还可以通过影响根际微生物的氧化作用来影响有毒元素的氧化和沉降^[26]。由于湿地植物 (包括水稻) 根系渗氧的产生以及根际微生物的活动等, 导致根际环境中的 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} , 并形成红棕色的铁锰氧化物胶膜附着在根系和根际土壤颗粒的表面, 将这些铁锰氧化物胶膜称之为铁膜^[27-28]。不同水稻品种根表、根际环境所形成的铁膜量具有显著性差异, 铁膜可以影响水稻的砷吸收和积累^[29-30]。影响铁膜形态和数量的因素有很多, 包括植物根系渗氧、温度、pH 值、 CO_2 、土壤通透性以及土壤中的 Fe、Mn、Al 含量以及一系列微生物活动等, 根系渗氧被认为是控制铁膜形成的最重要的生物因素^[31]。渗氧对水稻砷吸收的影响的原因, 可能是因其对铁膜形成的影响。

4 结论

(1) 不同渗氧能力 (玉香油占 > 巴西陆稻 > CNT 87059-3) 的水稻品种的耐性指数不同, 渗氧能力最强的玉香油占的耐性指数 (2 mg/L 的砷处理) 最高, 为 0.71; CNT 87059-3 为 0.55, 巴西陆稻为 0.17。随着砷处理浓度的升高, 3 种水稻品种的耐性指数均有所下降。

(2) 砷处理 30 d 后, 不同水稻品种生物量存在显著差异 ($P<0.05$), 但渗氧能力高的水稻品种比渗氧能力较低的品种随砷处理浓度增加生物量的降低较少。随着砷处理浓度的增加, 3 种水稻品种生物量

减少比例大小顺序为:玉香油占<巴西陆稻<CNT 87059-3。

(3)不同水稻品种的地下部分砷含量存在显著性差异($P<0.01$),但地上部分砷含量不存在显著性差异($P>0.05$)。渗氧能力较强的水稻品种与渗氧能力较弱的品种相比,能显著减少砷在根部(地下部分)的积累。

References:

- [1] Lei M, Yue Q L, Chen T B, Huang Z C, Liao X Y, Liu Y R, Zheng G D, Chang Q R. Heavy metal concentrations in soils and plants around Shizhuyuan mining area of Hu'nan Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 1146-1151.
- [2] Cai B S, Chen T B, Liao X Y, Xie H, Xiao X Y, Lei M, Zhang G P. Arsenic concentrations in soils and vegetables and their risk assessments in highly contaminated area in Hu'nan Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(4): 711-717.
- [3] Stone R. Arsenic and paddy rice: a neglected cancer risk. *Nature*, 2008, 321(5886): 184-185.
- [4] Liao X Y, Chen T B, Xiao X Y, Huang Z C, An Z Z, Mo L Y, Li W X, Chen H, Zheng Y M. Spatial distributions of arsenic in contaminated paddy soils. *Geographical Research*, 2003, 22(5): 635-643.
- [5] Zhu Y G, Williams P N, Meharg A A. Exposure to inorganic arsenic from rice: A global health issue? *Environmental Pollution*, 2008, 154(2): 169-171.
- [6] Liao X Y, Chen T B, Xie H, Liu Y R. Soil as contamination and its risk assessment in areas near the industrial districts of Chenzhou City, Southern China. *Environment International*, 2005, 31(6): 791-798.
- [7] Williams P N, Price A H, Raab A, Hossain S A, Feldmann J, Meharg A A. Variation in arsenic speciation and concentration in paddy rice related to dietary exposure. *Environmental Science and Technology*, 2005, 39(15): 5531-5540.
- [8] Liu Z Y, Chen G Z, Tian Y W. Arsenic tolerance, uptake and translocation by seedlings of three rice cultivars. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(7): 3228-3235.
- [9] Deng H, Ye Z H, Wong M H. Lead, zinc and iron (Fe^{2+}) tolerances in wetland plants and relation to root anatomy and spatial pattern of ROL. *Environmental and Experimental Botany*, 2009, 65(2/3): 353-362.
- [10] Peng X Y, Wang M Y, Liu F J, Ye Z H. Arsenic contamination, uptake and metabolism in rice (*Oryza sativa* L.). *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(17): 4782-4791.
- [11] Colmer T D. Aerenchyma and an inducible barrier to radial oxygen loss facilitate root aeration in upland, paddy and deep-water rice (*Oryza sativa* L.). *Annals of Botany*, 2003, 91: 301-309.
- [12] Colmer T D. Long-distance transport of gases in plants: a perspective on internal aeration and radial oxygen loss from roots. *Plant, Cell and Environment*, 2003, 26(1): 17-36.
- [13] Kludze H K, DeLaune R D, Patrick W H Jr. A colorimetric method for assaying dissolved oxygen loss from container-grown rice roots. *Agronomy Journal*, 1994, 86(3): 616-621.
- [14] Liu Y, Tam N F Y, Yang J X, Pi N, Wong M H, Ye Z H. Mixed heavy metals tolerance and radial oxygen loss in mangrove seedlings. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, 58(12): 1843-1849.
- [15] Pi N, Tam N F Y, Wong M H. Effects of wastewater discharge on formation of Fe plaque on root surface and radial oxygen loss of mangrove roots. *Environmental Pollution*, 2010, 158(2): 381-387.
- [16] IARC. 2004. Some drinking-water disinfectants and contaminants, including arsenic. In: IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans (IARC working group on the evaluation of carcinogenic risks to humans). World Health Organization, Lyon, France. vol 84: 41-42.
- [17] Mei X Q, Ye Z H, Wong M H. The relationship of root porosity and radial oxygen loss on arsenic tolerance and uptake in rice grains and straw. *Environmental Pollution*, 2009, 157(8/9): 2550-2557.
- [18] Wu C, Ye Z H, Shu W S, Zhu Y G, Wong M H. Arsenic accumulation and speciation in rice are affected by root aeration and variation of genotypes. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62(8): 2889-2898.
- [19] Ye Z H, Baker A J M, Wong M H, Willis A J. Zinc, lead and cadmium tolerance, uptake and accumulation by *Typha latifolia*. *New Phytologist*, 1997, 136(3): 469-480.
- [20] Allen S E. Chemical Analysis of Ecological Materials. 2nd ed. Oxford: Blackwell Sci., 1989.
- [21] Marin A R, Masscheleyn P H, Patrick W H. Soil redox-pH stability of arsenic species and its influence on arsenic uptake by rice. *Plant and Soil*, 1993, 152(2): 245-253.
- [22] Abedin M J, Cresser M S, Meharg A A, Feldmann J, Cotter-Howells J. Arsenic accumulation and metabolism in rice (*Oryza sativa* L.). *Environmental Science and Technology*, 2002, 36(5): 962-968.
- [23] McDonald M P, Galwey N W, Colmer T D. Waterlogging tolerance in the tribe Triticeae: the adventitious roots of *Critetion maritimum* have a relatively high porosity and a barrier to radial oxygen loss. *Plant, Cell and Environment*, 2001, 24(6): 585-596.
- [24] McDonald M P, Galwey N W, Colmer T D. Similarity and diversity in adventitious root anatomy as related to root aeration among a range of wetland and dryland grass species. *Plant, Cell and Environment*, 2002, 25(3): 441-451.
- [25] Begg C B, Kirk G J D, Mackenzie A F, Neue H U. Root-induced iron oxidation and pH changes in the lowland rice rhizosphere.

New Phytologist, 1994, 128(3): 469-477.

- [26] Revsbech N P, Pedersen O, Reichardt W, Briones A. Microsensor analysis of oxygen and pH in the rice rhizosphere under field and laboratory conditions. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 29(4): 379-385.
- [27] Crowder A A, St-Cyr L. Iron oxide plaque on wetland roots. *Trends in Soil Science*, 1991, (1): 315-329.
- [28] Liu W J, Zhu Y G. Iron and Mn plaques on the surface of roots of wetland plants. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(2): 358-363.
- [29] Liu W J, Zhu Y G, Smith F A, Smith S E. 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.
- [30] Liu W J, Zhu Y G, Smith F A, Smith S E. Do phosphorus nutrition and iron plaque alter arsenate (As) uptake by rice seedlings in hydroponic culture? *New Phytologist*, 2004, 162(2): 481-488.
- [31] Mendelsohn I A, Kleiss B A, Wakeley J S. Factors controlling the formation of oxidized root channels: a review. *Wetlands*,

1995, 15(1): 37-46.

参考文献:

- [1] 雷梅, 岳庆玲, 陈同斌, 黄泽春, 廖晓勇, 刘颖茹, 郑国砥, 常庆瑞. 湖南柿竹园矿区土壤重金属含量及植物吸收特征. *生态学报*, 2005, 25(5): 1146-1151.
- [2] 蔡保松, 陈同斌, 廖晓勇, 谢华, 肖细元, 雷梅, 张国平. 土壤砷污染对蔬菜砷含量及食用安全性的影响. *生态学报*, 2004, 24(4): 711-717.
- [4] 廖晓勇, 陈同斌, 肖细元, 黄泽春, 安志装, 莫良玉, 李文学, 陈煌, 郑袁明. 污染水稻田中土壤含砷量的空间变异特征. *地理研究*, 2003, 22(5): 635-643.
- [8] 刘志彦, 陈桂珠, 田耀武. 不同水稻品系幼苗对砷(As)的耐性、吸收及转运. *生态学报*, 2008, 28(7): 3228-3235.
- [10] 彭小燕, 王茂意, 刘凤杰, 叶志鸿. 水稻砷污染及其对砷的吸收和代谢机制. *生态学报*, 2010, 30(17): 4782-4791.
- [28] 刘文菊, 朱永官. 湿地植物根表的铁锰氧化物膜. *生态学报*, 2005, 25(2): 358-363.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.4 Feb., 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- The bioavailability of dissolved organic carbon in the eutrophic lakes YE Linlin, KONG Fanxiang, SHI Xiaoli, et al (779)
- Plant species of the non-agricultural habitats in the lower reaches of the Yellow River plain agro-landscape
..... LU Xunling, LIANG Guofu, TANG Qian, et al (789)

Autecology & Fundamentals

- Manganese stress on the ultrastructures of a manganese tolerant plant, *Polygonum perfoliatum* L.
..... WANG Jun, WU Hui, XUE Shengguo, et al (798)
- Characteristics of arsenic (As) tolerance and accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) genotypes with different radial oxygen loss
..... WU Chuan, MO Jingyu, XUE Shengguo, et al (807)
- Effects of water stress on physiological characteristics of different *Illicium lanceolatum* ecotypes under low light intensity
..... CAO Yonghui, ZHOU Benzhi, CHEN Shuanglin (814)
- Effect of branch number on the growth and development of *Morus alba* saplings ... HUAN Huihui, XU Xiao, LIU Gang, et al (823)
- Spatial distribution pattern and sampling technique for *Orthotylus* (*O.*) *sophorae* nymphs on *Sophora japonica*
..... ZHU Huiying, SHEN Ping, WU Jianhua, et al (832)
- Assessment of fungal diversity in apple replanted orchard soils by T-RFLP analysis
..... YIN Chengmiao, WANG Gongshuai, LI Yuanyuan, et al (837)
- Effects of dazomet on edaphon and growth of *Malus hupehensis* rehd. under continuous apple cropping
..... LIU Entai, LI Yuanyuan, HU Yanli, et al (847)
- Isolation, identification, and performance of two pyrene-degrading endophytic bacteria SUN Kai, LIU Juan, LI Xin, et al (853)

Population, Community and Ecosystem

- Effects of different temperatures on the growth and development of *Eotetranychus Kankitus* (Ehara)
..... LI Yingjie, WANG Ziyang, ZHANG Guohao, et al (862)
- Effect of available burrow densities of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) on plant niche of alpine meadow communities in the
Qinghai-Tibet Plateau JIA Tingting, MAO Liang, GUO Zhenggang (869)
- Correlation between characteristics of *Reaumuria soongarica* communities and soil factors in the Sangong River basin
..... ZHAO Xuechun, LAI Liming, ZHU Linhai, et al (878)
- Effects of afforestation on soil microbial community structure in the arid valley of Minjiang River
..... WANG Weixia, LUO Da, SHI Zuomin, et al (890)
- Effects of reclamation on tidal flat and land use on soil microbial community
..... LIN Li, CUI Jun, CHEN Xueping, FANG Changming (899)
- Effects of *Pomacea canaliculata* on aquatic macrophyte community structure in paddy fields
..... ZHAO Benliang, ZHANG Jiaen, DAI Xiaoyan, et al (907)
- The adaptability and decontamination effect of four kinds of woody plants in constructed wetland environment
..... CHEN Yonghua, WU Xiaofu, HAO Jun, et al (916)
- Carbon budget of alpine *Potentilla fruticosa* shrubland based on comprehensive techniques of static chamber and biomass harvesting ...
..... LI Hongqin, LI Yingnian, ZHANG Fawei, et al (925)
- Effect of initial pH value on microbial Fe (III) reduction in alkaline and acidic paddy soils ... WU Chao, QU Dong, LIU Hao (933)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Climate environmental change and stable carbon isotopes in age layers of *Tamarix* sand-hillocks in Kumtag desert
..... ZHANG Jinchun, YAO Tuo, LIU Changzhong, et al (943)

Resource and Industrial Ecology

- The critical factors of transpiration on muskmelon in plastic greenhouse ZHANG Dalong, CHANG Yibo, LI Jianming, et al (953)
- Ion absorption and distribution of symbiotic *Reaumuria soongorica* and *Salsola passerina* seedlings under NaCl stress
..... ZHAO Xin, YANG Xiaojun, SHI Yong, et al (963)
- The relationship between selected rhizosphere and non-rhizosphere soil properties and the quality of *Pyrola decorata*
..... GENG Zengchao, MENG Lingjun, LIU Jianjun (973)
- Spatial variation analysis of soil organic matter and nutrient factor for before and after planting crops
..... FANG Bin, WU Jinfeng (983)

Urban, Rural and Social Ecology

- Establishment and application of the index system for urban river health assessment
..... DENG Xiaojun, XU Youpeng, ZHAI Luxin, et al (993)
- Dynamic analysis of the ecological footprint and carrying capacity of tibet AN Baosheng, CHENG Guodong (1002)

Research Notes

- Responses of soil microorganisms and soil enzyme activities to different land use patterns in the water-level-fluctuating zone of
the Three Gorges Reservoir region MA Peng, LI Changxiao, LEI Ming, et al (1010)
- Effects of salt stress on growth and root development of two oak seedlings
..... WANG Shufeng, HU Yunxue, SUN Haijing, et al (1021)
- The effects of constant and variable thermal acclimation on thermal tolerance of the common giant toad tadpoles (*Bufo gargarizans*) ...
..... WANG Lizhi (1030)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 董 鸣 编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 34 卷 第 4 期 (2014 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 34 No. 4 (February, 2014)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@ cspg. net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@ cspg. net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元