

殷行行, 郑向群, 丁永祯, 等. 亚硒酸盐对旱稻吸收、转运砷及其氧化性胁迫的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(5): 817-825.

YIN Xing-xing, ZHENG Xiang-qun, DING Yong-zhen, et al. Effect of selenite on arsenic uptake, translocation, and oxidative stress in upland rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(5): 817-825.

亚硒酸盐对旱稻吸收、转运砷及其氧化性胁迫的影响研究

殷行行^{1,2,3}, 郑向群^{2,3}, 丁永祯^{2,3*}, 冯人伟^{2,3}, 师荣光^{2,3}, 成卫民^{2,3}, 陈咄圳^{2,3}

(1.沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866; 2.农业部环境保护科研监测所, 天津 300191; 3.农业部产地环境污染防控重点实验室, 天津 300191)

摘要:通过盆栽试验,以As低吸收旱稻(V1)和高吸收旱稻(V2)品种为材料,研究无污染(CK)及轻、中度As污染(65.2、83.9 mg·kg⁻¹)土壤中,土施Se(0、1.0、5.0 mg·kg⁻¹)对旱稻生长、As吸收转运及其氧化性胁迫的影响。结果显示:低、高Se处理在轻度As胁迫下,V1生物量较对照分别增加了3.50%和31.13%,V2分别增加了17.89%、34.95%;在中度As胁迫下,V1增幅分别为56.42%和122.96%,V2增幅分别为34.38%和38.73%。Se促进了根系As吸收,显著降低了As从根系向地上部转运,降低了茎叶As累积。在无、轻、中度As污染土壤中,高Se处理V1根As含量较对照分别增加了55.69%、27.08%和18.22%,茎As分别减少了18.89%、21.10%和30.93%,叶As分别减少了19.63%、27.68%和15.12%;V2根As含量分别增加了48.98%、23.82%和12.71%,茎As分别减少了17.02%、24.58%和16.16%,叶As分别减少了17.61%、20.52%和13.26%。Se在As胁迫下显著降低了叶MDA含量,低、高Se处理在轻度As胁迫下,V1叶MDA含量分别降低9.73%和13.26%,V2分别降低16.09%和20.68%;中度As胁迫下,V1分别降低9.29%和19.01%,V2分别降低14.80%和19.79%。V1在不同As胁迫下,Se显著提高了抗氧化酶(SOD、POD和CAT)活性,而V2在As胁迫增强下,Se对抗氧化酶活性先促进后抑制。研究表明,Se能有效缓解旱稻As胁迫,低、高As吸收品种的差异与机制,主要体现在V2对As的吸收与转运远高于V1,以及V2体内的MDA含量、POD和CAT活性远高于V1。

关键词:旱稻;砷;硒;丙二醛;抗氧化酶活性

中图分类号:S511.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)05-0817-09 doi:10.11654/jaes.2017-0285

Effect of selenite on arsenic uptake, translocation, and oxidative stress in upland rice

YIN Xing-xing^{1,2,3}, ZHENG Xiang-qun^{2,3}, DING Yong-zhen^{2,3*}, FENG Ren-wei^{2,3}, SHI Rong-guang^{2,3}, CHENG Wei-min^{2,3}, CHEN Pei-zhen^{2,3}
(1.College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 2.Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China; 3.Key Laboratory of Agro-Environmental Pollution Control and Prevention, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China)

Abstract: Pot experiments were conducted to study the effects of different concentrations (0, 1.0, and 5.0 mg·kg⁻¹) of selenium (Se) on growth, arsenic (As) uptake and transport, and physiological parameters of upland rice under stress induced by different concentrations (20.1, 65.2, and 83.9 mg·kg⁻¹) of As. Low (V1) and high (V2) As-accumulating upland rice were selected as the experimental materials. V1 and V2 are different varieties of the same species. The results showed that under low-concentration As stress, V1 biomass increased by 3.50% and 31.13%, compared with the control (CK), in soils with low and high Se concentration, respectively, whereas V2 biomass increased by 17.89% and 34.95%, respectively. Under medium-concentration As stress, V1 biomass rose by 56.42% and 122.96%, and V2 by 34.38% and 38.73% at high and low Se concentrations, respectively. Se increased the As content in the roots but reduced As accumulation in stalks

收稿日期:2017-03-06

作者简介:殷行行(1989—),女,山东德州人,硕士研究生,从事农田重金属污染防治工作。E-mail:ryinxingxing@163.com

*通信作者:丁永祯 E-mail:dingyongzhen@caas.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41471274,41101306);国家科技支撑计划课题(2015BAL01B01)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (41471274, 41101306); The National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (2015BAL01B01)

and leaves, and distinctly reduced As transport coefficients from root to stem. Under conditions of no, slight, and medium As stress in soil containing a high concentration of Se, As increased in the roots of V1 by 55.69%, 27.08%, and 18.22%, respectively, whereas it decreased in the stems by 18.89%, 21.10%, and 30.93%, and in the leaves by 19.63%, 27.68%, and 15.12%, respectively. Under the same conditions, As increased in the roots of V2 by 48.98%, 23.82%, and 12.71%, whereas it decreased in the stems by 17.02%, 24.58%, and 16.16%, and in the leaves by 17.61%, 20.52%, and 13.26%, respectively. The malondialdehyde (MDA) content in leaves rose under As stress, but Se treatment resulted in a significant reduction in the MDA content. Under low-concentration As stress in soils with low and high Se concentrations, the MDA content in V1 leaves decreased by 9.73% and 13.26%, respectively, whereas that in V2 leaves decreased by 16.09% and 20.68%. Similarly, under medium-concentration As stress, the MDA content in V1 leaves decreased by 9.29% and 19.01%, respectively, whereas that in V2 decreased by 14.80% and 19.79%. In V1, Se clearly enhanced the activity of antioxidant enzymes (SOD, POD, and CAT) in leaves under different levels of As stress, whereas in V2, Se enhanced and inhibited antioxidant enzyme activity under low- and medium-concentration As stress, respectively. This study shows that Se can effectively relieve As stress in upland rice. Owing to differences in the As uptake mechanism of the low (V1) and high (V2) As-accumulating species, As uptake and transport in V2 are considerably more efficient than those in V1, and the MDA concentrations and POD and CAT activities of V2 are considerably higher than those in V1.

Keywords: upland rice; arsenic; selenium; malondialdehyde content; antioxidant enzyme activity

砷(As)是典型有毒致病元素,其污染已成为全球尤其是东南亚地区面临的重大环境问题之一^[1]。在我国湖南、云贵、两广等地区,砷污染也非常突出,石门某雄黄矿区周边农田土壤砷平均含量高达 99.51 mg·kg⁻¹^[2]。稻米砷含量普遍高于其他作物,是世界范围内最大的砷食物暴露源^[3],如何控制水稻砷吸收及稻米砷累积,是当前亟需解决的重要问题之一。

水分显著影响土壤砷生物有效性^[4-5],富氧条件下砷主要以五价态存在,可被强烈地吸附到粘粒矿物、铁锰氧化物及其水化氧化物和土壤有机质上,还可与铁矿以砷酸铁的形式共沉淀^[6],而且土壤磷酸根对水稻吸收砷的抑制作用会增强^[7]。常规淹水种植,水稻根及籽粒对砷有明显富集效应,籽粒总砷是富氧条件下的 10~15 倍^[8]。丁永祯等^[9]提出,砷污染农田可通过种植旱稻实现稻米安全,29 份不同基因型旱稻种植在 4 余倍土壤环境质量的 As 污染土壤中,糙米 As 含量全部达标^[10]。

农田环境因素复杂,多技术联合阻控往往比单一技术更有效。硒(Se)是某些抗氧化酶和谷胱甘肽过氧化物酶的组成成分,可抑制膜脂过氧化、增加抗氧化酶的活性^[11-12],施硒对植物吸收汞^[13]、铅^[14]、镉^[15]、镉^[12]以及砷^[16-17]等重金属具有显著的阻抗效果。土壤无机硒主要以四价硒[Se(IV)]和六价硒[Se(VI)]存在,前者与 As 在水稻根系吸收中存在显著的相互促进作用,而后者无明显影响,但在地上部,二者对 As 的积累均存在显著的拮抗效应,且 Se(IV)抑制效果高于 Se(VI)^[18]。Liao 等^[19]也研究发现,Se(IV)比 Se(VI)更

能降低稻米 As 含量。

对于旱稻来说,有关 Se 影响 As 的吸收研究比较薄弱,本研究在前期工作基础上,以砷高、低吸收基因型旱稻为材料,选择对水稻砷吸收抑制效果更显著的 Se(IV)^[19],研究砷胁迫下硒对旱稻生长、砷吸收及相关生理特性的影响,以期为稻田砷污染防控提供理论基础和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

旱稻材料为本研究团队从上海市农业生物基因中心提供的不同基因型旱稻资源中筛选得到的对 As 吸收差异较大的品种^[10],低吸收品种为 DOURADOAG ULHA(V1),高吸收品种为 SINALOAA68(V2)。试验土壤采自湖南省郴州市某地区稻田土壤(0~20 cm),As 浓度梯度分别为 20.1、65.2、83.9 mg·kg⁻¹,依据土壤环境质量标准(GB 15618—1995)和“全国土壤污染调查公报”(2014),3 种土壤分别为无污染、轻度污染和重度污染,无污染土壤作为对照。采回的土壤经自然风干、过筛、去杂质和充分混匀后备用,其基本理化性状见表 1。

1.2 试验方法

盆栽试验于玻璃温室大棚开展,土壤 Se(IV)处理设 3 种梯度:0 (CK)、1.0 mg·kg⁻¹ (Se1)、5.0 mg·kg⁻¹ (Se5),每个旱稻品种 9 个处理,共 18 个处理,每处理重复 4 次。每盆装风干土 3 kg,播种前按 N:P₂O₅:K₂O=1:1:1(质量比)施入基肥,同时进行硒处理(添加

表1 供试土壤理化性质

Table 1 The physical and chemical properties of the tested soils

| 土壤 | pH | CEC/cm \cdot L $^{-1}$ | As/mg \cdot kg $^{-1}$ | Se/mg \cdot kg $^{-1}$ | 有机质/g \cdot kg $^{-1}$ | 有效磷/mg \cdot kg $^{-1}$ | 总磷/mg \cdot kg $^{-1}$ | 总氮/mg \cdot kg $^{-1}$ |
|---------|------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 无污染(CK) | 6.65 | 12.47 | 20.1 | 0.65 | 24.3 | 11.63 | 488.5 | 1 691.2 |
| 轻度污染 | 7.56 | 13.83 | 65.2 | 0.91 | 45.6 | 64.59 | 1 117.3 | 2 596.8 |
| 中度污染 | 7.76 | 13.68 | 83.9 | 0.86 | 38.9 | 50.29 | 1 253.8 | 2 264.0 |

Na₂SeO₃ 化学纯),保持土壤湿润平衡 7 d。早稻种子用 10%的 H₂O₂ 溶液浸泡消毒 30 min 后,去离子水冲洗干净,于培养皿催芽 2 d,露白后直播。每盆播种 8~10 粒,三叶期定株,每盆留 5 株。其他操作同常规大田生产。

孕穗期收样,先收集茎叶(地上 2 cm),将新鲜样品快速运至实验室,称重后茎叶分开,用自来水冲洗干净,去离子水润洗 3 次后滤纸吸干表面水分,叶片液氮制样,-80 ℃保存,用于丙二醛含量和抗氧化酶活性测定,剩余茎、叶及充分洗干净的根于 105 ℃杀青 30 min,70 ℃烘干至恒重后粉碎,用于测定砷含量。

1.3 样品分析

丙二醛含量和抗氧化酶活性测定参照李合生^[20]方法进行,其中丙二醛(MDA)含量采用三氯乙酸提取-硫代巴比妥酸显色-分光光度计法测定,SOD 活性采用氮蓝四唑法测定,POD 活性采用愈创木酚显色法测定,CAT 活性采用紫外吸收法测定。植物干样用硝酸-高氯酸(4:1)混合消煮^[21],As 含量用 ICP-MS (Agilent 7900x, USA)测定,As 仪器检出限<0.01 μg \cdot L $^{-1}$ 。分析过程中每隔 20 个样品随机选取 1 个样品进行重复测量,重复性偏差满足《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—2004)的要求,同时在测定过程中每 20 个样品回测 1 次标准溶液,回测偏差≤5%。使用国家标准物质大米粉(GBW 10010)进行质量控制,回收率在 90%~110%之间,测定结果全部在定值范围内。

1.4 数据处理与分析

转运系数:早稻地上部(茎/叶)As 浓度与根中 As 浓度的比值,表示早稻根系转运 As 至地上部的能力。

数据处理采用 Microsoft Excel 2013 及 Origin 8.5,统计分析和差异显著性检验用 SPSS 17.0 统计软件,通过最小显著法(LSD)检验差异显著性($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 砷胁迫下硒对早稻生长的影响

砷胁迫对早稻 V1、V2 生长有显著抑制作用(图

1),且随土壤砷污染程度的加深而加剧。轻、中度污染土壤与对照土壤相比,V1 的生物量分别降低了 54.72%和 89.32%,V2 分别降低了 65.59%和 92.41%,砷对高砷基因型 V2 的抑制效应大于低砷基因型 V1。

砷胁迫下,硒对早稻在生物量上表现出明显的缓解效应。轻度条件下,V1、V2 生物量在低 Se、高 Se 处理下较对照显著增加,V1 增幅分别为 3.50%和 31.13%,V2 增幅分别为 17.89%和 34.95%;中度污染下,V1 增幅分别为 56.42%和 122.96%,V2 增幅分别为 34.38%和 38.73%。

2.2 砷胁迫下硒对早稻砷吸收的影响

比较根、茎、叶 As 含量,品种 V1 表现为低吸收,V2 表现为高吸收,不同部位间 As 含量为根>茎>叶,且各部位 As 含量随土壤浓度的升高而升高(图 2~

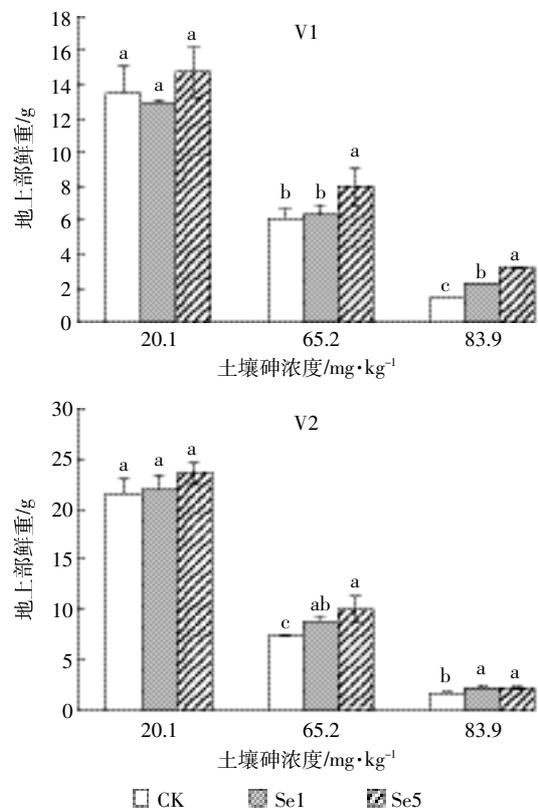


图1 砷胁迫下硒对早稻生物量的影响

Figure 1 Effects of Se on biomass of upland rice under As stress

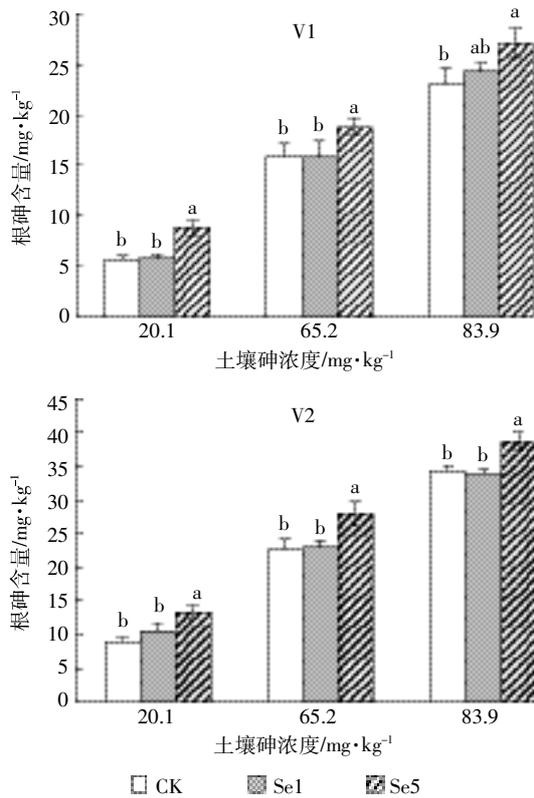


图2 硒对旱稻根砷含量的影响

Figure 2 Effects of Se on As content in root of upland rice under As stress

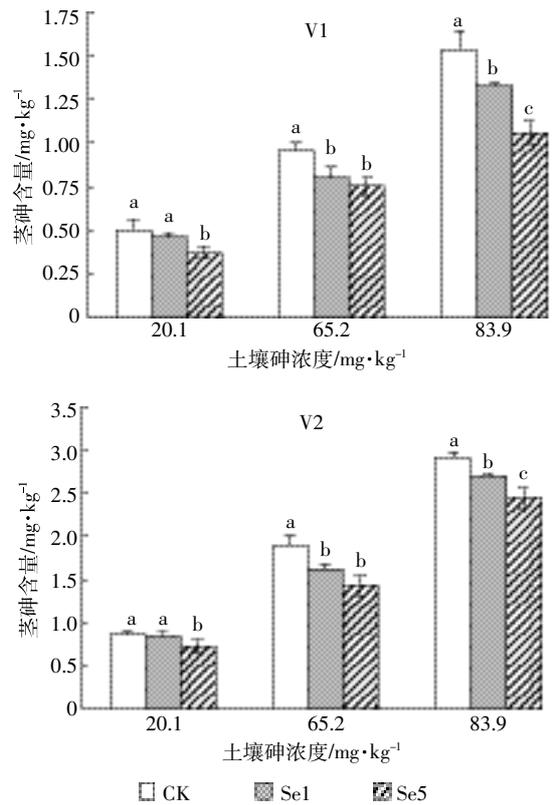


图3 硒对旱稻茎砷含量的影响

Figure 3 Effects of Se on As content in stem of upland rice under As stress

图4)。与对照土壤相比,轻、中度污染条件下,V1根系As含量分别增加了1.63倍和3.07倍,V2分别增加了1.54倍和2.85倍;V1茎部As含量分别增加了1.09倍和2.35倍,V2分别增加了1.19倍和2.38倍;V1叶部As含量分别增加了0.87倍和1.94倍,V2分别增加了0.96倍和2.14倍。

As胁迫下,Se对旱稻不同部位As含量的影响不同。对根系来说(图2),低浓度Se对As含量无显著影响,高浓度Se增加了As含量,在CK、轻、中度As污染土壤中,V1根系砷含量较对照增幅分别为55.69%、27.08%和18.22%,V2砷含量增幅分别为48.98%、23.82%和12.71%。

对茎部(图3),除低Se在对照土壤中对As含量无显著影响外,其他条件下均显著减少了As含量。茎部As含量在轻、中度As胁迫下,低Se处理V1砷含量较对照分别降低了16.25%和20.31%,V2分别降低了15.01%和7.32%;高Se处理V1砷含量分别降低了21.10%和30.93%,V2分别降低了24.58%和16.16%。Se浓度越高,茎部As含量降幅越大,在对照土壤中,高Se显著降低了茎部As含量,V1、V2砷含

量分别降低了18.89%和17.02%。

As胁迫下硒对旱稻叶As含量的影响与茎相似(图4),对照土壤中,高Se处理显著降低了V1、V2叶部As含量,降幅分别为19.63%和17.61%。轻、中度As污染土壤中,低Se处理V1砷含量分别降低了19.28%和15.33%,V2分别降低了13.26%和9.47%;高Se处理V1分别降低了27.68%和15.12%,V2分别降低了20.52%和13.26%。Se浓度越高,叶部As含量降低幅度越大。

2.3 砷胁迫下硒对旱稻砷转运的影响

As从根向茎、叶的转运系数见表2。在无、轻、中污染土壤中,不施Se条件下,茎/根转运系数V2较V1分别高出19.75%、37.70%和26.87,叶/根转运系数分别高出8.22%、27.08%和39.13%,说明As从地下部向地上部转运能力差异是旱稻As高、低吸收的重要原因之一。施Se显著降低了As转运,低Se、高Se处理在无污染条件下,茎/根转运系数V1分别降低3.00%和48.09%,V2分别降低16.72%和44.21%,叶/根转运系数V1分别降低9.93%和48.38%,V2分别降低23.52%和44.74%;在轻度污染下,茎/根转运

系数 V1 分别降低 16.01% 和 33.89%, V2 分别降低 16.58% 和 39.25%, 叶/根转运系数 V1 分别降低 19.17% 和 39.36%, V2 分别降低 14.95% 和 35.71%; 在中度污染下, 茎/根转运系数 V1 分别降低 18.71% 和 41.63%, V2 分别降低 5.64% 和 25.66%, 叶/根转运系

数 V1 分别降低 8.42% 和 20.79%, V2 分别降低 7.67% 和 22.91%。

2.4 砷胁迫下硒对旱稻叶片丙二醛含量的影响

叶部 MDA 含量 V1 整体较 V2 低, 砷胁迫下, MDA 的含量显著提高(图 5), 与对照土壤相比, 轻、

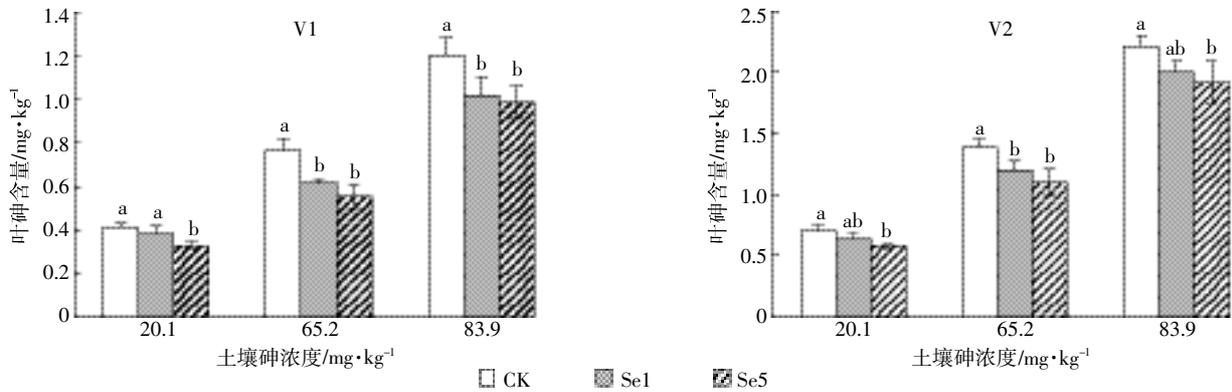


图 4 硒对旱稻叶砷含量的影响

Figure 4 Effects of Se on As content in leaves of upland rice under As stress

表 2 砷胁迫下硒对旱稻砷转运系数的影响

Table 2 Effects of Se on As transport coefficients of upland rice under As stress

| 土壤 As 浓度/mg·kg ⁻¹ | Se 处理/mg·kg ⁻¹ | 茎/根 | | 叶/根 | |
|------------------------------|---------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | | V1 | V2 | V1 | V2 |
| 20.1 | CK | 0.081±0.007a | 0.097±0.007a | 0.073±0.004a | 0.079±0.006a |
| | Se1 | 0.079±0.002a | 0.081±0.008b | 0.066±0.003b | 0.061±0.007b |
| | Se5 | 0.042±0.001b | 0.054±0.008c | 0.038±0.001c | 0.044±0.002c |
| 65.2 | CK | 0.061±0.002a | 0.084±0.009a | 0.048±0.000a | 0.061±0.004a |
| | Se1 | 0.051±0.006b | 0.070±0.006b | 0.039±0.004b | 0.052±0.001b |
| | Se5 | 0.040±0.001c | 0.051±0.004c | 0.029±0.002c | 0.039±0.005c |
| 83.9 | CK | 0.067±0.004a | 0.085±0.004a | 0.046±0.007a | 0.064±0.003a |
| | Se1 | 0.054±0.001b | 0.080±0.002b | 0.042±0.005a | 0.059±0.004a |
| | Se5 | 0.039±0.001c | 0.063±0.005c | 0.036±0.001b | 0.050±0.006b |

注:不同字母表示差异显著(P<0.05)。

Note: Values followed by different letters are significantly different at P<0.05.

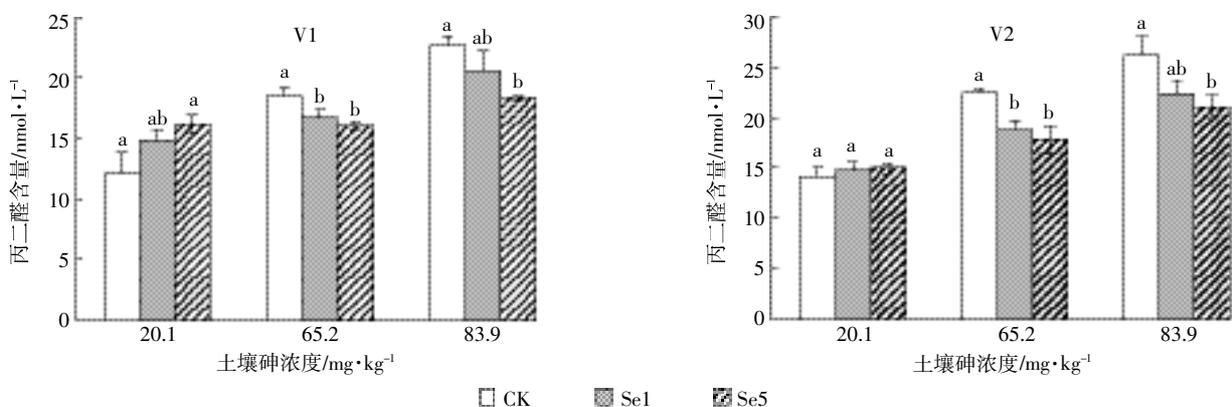


图 5 砷胁迫下硒对旱稻叶片 MDA 含量的影响

Figure 5 Effects of Se on MDA content in leaves of upland rice under As stress

中度 As 污染条件下,MDA 含量 V1 分别增加了 52.59%和 86.54%,V2 分别增加了 58.56%和 85.31%。轻、中度 As 胁迫下,施硒显著降低了 MDA 含量,但低、高 Se 处理间无显著性差异。轻度 As 胁迫下,低、高 Se 处理 V1 品种 MDA 含量分别降低了 9.73%和 13.26%,V2 分别降低了 16.09%和 20.68%。中度 As 胁迫下,低、高 Se 处理 V1 分别降低了 9.29%和 19.01%,V2 分别降低了 14.80%和 19.79%。

2.5 砷胁迫下硒对旱稻叶片抗氧化酶活性的影响

砷胁迫下,旱稻 V1、V2 叶片 SOD 呈现不同的变化趋势(图 6),与对照土壤相比,轻、中度 As 污染胁迫下,前者 SOD 分别降低了 12.29%和 21.20%,而后者 SOD 分别增加了 6.60%和 20.16%。施 Se 提高了叶片 SOD 含量,轻度 As 污染胁迫下,低 Se 和高 Se 处理 V1 叶片 SOD 分别升高了 9.70%和 38.54%,达显著性水平,V2 分别升高了 4.72%、7.26%;中度 As 污染胁迫下,低 Se 和高 Se 处理 V1 的 SOD 分别升高了 33.58%和 30.83%;V2 分别升高了 9.84%和 1.73%。

叶片 POD 含量随 As 胁迫的加强而增加(图 7),与对照土壤相比,轻、中度 As 胁迫下,V1 叶片 POD

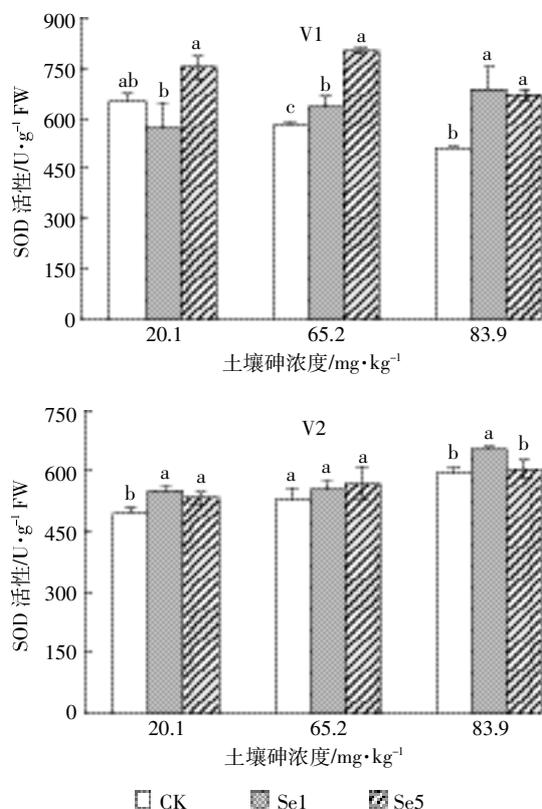


图 6 砷胁迫下硒对旱稻叶片 SOD 活性的影响

Figure 6 Effects of Se on SOD activity in leaves of upland rice under As stress

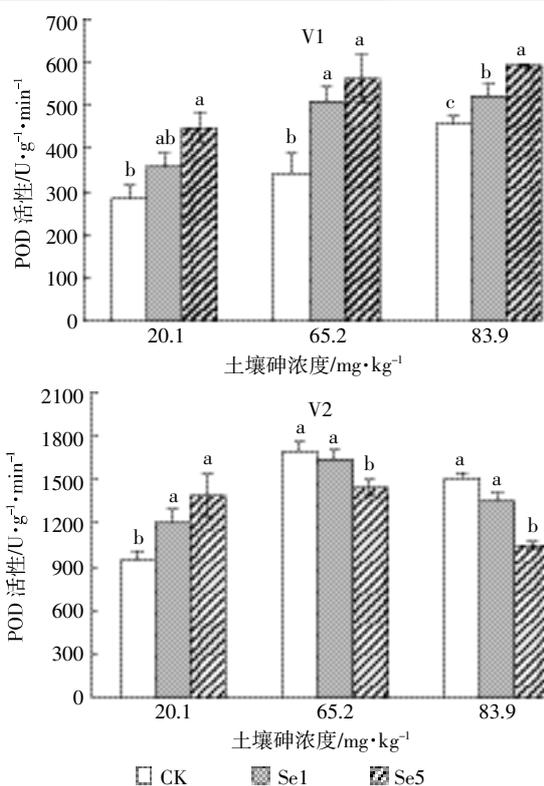


图 7 砷胁迫下硒对旱稻叶片 POD 活性的影响

Figure 7 Effects of Se on POD activity in leaves of upland rice under As stress

分别增加了 17.09%和 60.55%,V2 分别增加了 60.90%和 44.69%。高 As 吸收品种 V2 的 POD 含量远高于低 As 吸收品种 V1,且二者对施 Se 的响应表现不一。对照土壤中,Se 显著增加了两旱稻品种叶片 POD 的含量;轻度 As 胁迫下,低 Se、高 Se 处理 V1 叶 POD 分别增加了 48.33%和 63.58%,V2 分别降低了 3.75%和 15.02%;中度 As 胁迫下,低 Se、高 Se 处理 V1 叶 POD 分别增加了 14.19%和 29.89%,V2 分别降低了 10.88%和 31.04%。

与 POD 相似,高砷吸收品种 V2 的 CAT 活性明显高于低砷吸收品种 V1(图 8)。V1、V2 叶部 CAT 含量随 As 胁迫的加强呈现不同的变化趋势,V1 表现为先升高再下降,轻、中度 As 胁迫较对照分别升高了 27.86%和降低了 3.14%;而 V2 表现为先下降再升高,轻、中度 As 胁迫较对照分别下降了 7.58%和增加了 68.36%。对照土壤中,Se 增加了 V1、V2 叶片 CAT 含量,其中高 Se 提升 V1 达显著水平。轻度 As 胁迫下,随 Se 浓度升高,V1、V2 叶部 CAT 先显著降低后显著升高,其中高 Se 处理下,V2 叶部 CAT 比对照增加了 50.66%。中度 As 胁迫下,施 Se 对 V1、V2 的 CAT 活性分别起促进和抑制作用,低、高 Se 处理下,V1 升幅

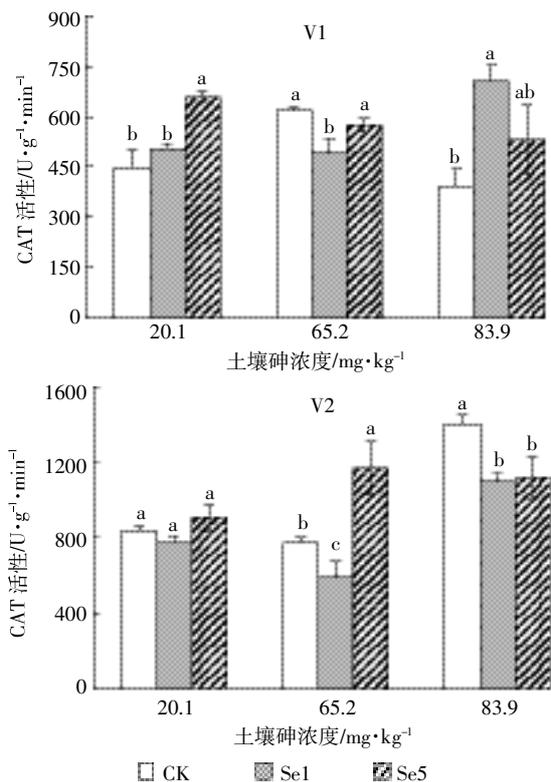


图8 砷胁迫下硒对早稻叶片CAT活性的影响

Figure 8 Effects of Se on CAT activity in leaves of upland rice under As stress

分别为 62.97% 和 22.93%, V1 降幅分别为 21.97% 和 20.48%。

3 讨论

As 对植物具有较强的毒性, 体现在早稻生物量随着土壤 As 浓度的升高而降低, 施 Se 显著提高了早稻地上部生物量, 缓解了 As 对早稻的毒害, 与水稻上的研究相似^[22]。

早稻根、茎、叶各部位 As 含量随土壤 As 浓度的升高而增加, 与生物量变化相反, 表明砷胁迫导致了植株毒害。土壤施 Se, 早稻根系 As 浓度增加, 而茎、叶 As 浓度降低, Se 显著降低了 As 从根系向茎叶的转运, 与前人在水稻中的研究结果相似^[17-18], 但也有研究^[19]显示, Se 只是显著降低了稻米和颖壳 As 浓度, 对根系和茎叶 As 含量影响不大。

植物吸收 Se(IV) 可通过磷酸盐转运蛋白^[23], 而磷酸盐转运蛋白亦是 As(V) 的吸收通道^[24], 同时, Se(IV) 和 As(III) 在植物体内的部分吸收共用水通道途径^[25], 因此, Se(IV) 对根系 As 吸收可能表现出抑制效应, 但本结果及部分前人研究^[17-18]表现出促进作用, Se 显著促进了根系 As 吸收, 但显著抑制了 As 从根

系向地上部转运, 显著降低了地上部 As 累积, 其确切作用机制目前还不是很清楚, 可能与 Se(IV) 被植物根系吸收后大部分被转化成有机 Se, 并与 As 形成络合物储存在根系细胞壁与液泡中有关^[18, 26]。而 Liao 等^[19]的研究结果显示, Se(IV) 和 Se(VI) 对水稻根系和茎叶 As 含量无影响。这些结果表明, Se 对稻作吸收、转运 As 及其机理值得深入探讨。

植物在重金属等逆境胁迫下, 会导致体内活性氧 (ROS) 积累而引起膜脂过氧化损伤, 导致膜通透性增加和膜功能受损, MDA 是膜脂过氧化的主要产物, 其含量可以反映植物受到氧化胁迫的程度^[27-28]。本研究中, 随着土壤 As 胁迫的加强, 叶片 MDA 含量显著提高, 表明早稻受到氧化胁迫的程度在加深。施 Se 在轻、中度 As 胁迫下, 显著降低了 MDA 含量, 表明 Se 缓解了早稻体内的膜脂过氧化反应, 减轻了 As 引起的氧化损伤。

植物体内存在的抗氧化酶, 如超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 和过氧化氢酶 (CAT) 等, 清除过量的 ROS, 阻止其积累以处于平衡状态。SOD 是植物中普遍存在的一种含金属的酶, 它能催化超氧自由基产生歧化反应, 生成分子氧和 H₂O₂, POD 和 CAT 则清除 H₂O₂ 形成 H₂O, 这些酶在植物体内相互协同保护细胞的膜结构, 在一定程度上缓解逆境胁迫对植株的伤害^[29]。随 As 胁迫加强, V1、V2 叶部 SOD、POD、CAT 活性大多升高或者先升高后降低, 与前人研究相似^[30], 说明 As 刺激了植物抗氧化酶活性增加, 以提高其消除体内氧自由基的能力, As 浓度过高使机体受损, 表现出抗氧化酶活性降低, 其差异与早稻品种有关, 也与不同抗氧化酶活性对 As 胁迫的响应有关。

施 Se 对 V1、V2 抗氧化酶活性的影响不同。对 V1 来说, 施 Se 显著提高了不同 As 胁迫下的 SOD、POD 和 CAT 活性, 不同抗氧化酶在响应 Se 缓解 As 毒害上表现出一致性; 对 V2 来说, 低 As 胁迫下, Se 促进抗氧化酶活性增加, 高 As 胁迫下, Se 抑制抗氧化酶活性。V1、V2 抗氧化酶活性在 Se 缓解 As 毒害方面表现出的差异性, 可能与二者对 As 的吸收差异有关, 亦与二者抗氧化酶活性对 As 胁迫的响应不同有关。V2 叶部的 MDA 含量, 特别是 POD 和 CAT 活性较 V1 高出很多, V2 对活性氧自由基的清除功能更强, 这可能是其高 As 吸收特征的主要机制之一, 与砷富集植物和非砷富集植物的抗氧化酶结果相似^[31]。V1 体内 POD 和 CAT 活性低, Se 缓解 As 胁迫下的诱导上升空间大, 可解释 Se 显著减少茎叶 As 含量的现

象。施 Se 也显著降低了 V2 茎叶 As 含量, 但 POD、CAT 反而下降, 可能存在其他的抗氧化物质来清除失衡的 H_2O_2 , 例如还原型谷胱甘肽(GSH)和还原型谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)。总体来说, As 胁迫下 Se 缓解旱稻 As 毒害与 As 吸收转运的机制有待进一步研究。

4 结论

(1) As 胁迫对旱稻毒性明显, 施 Se 能有效缓解 As 毒害, 提高旱稻地上部生物量。

(2) Se 增加了旱稻根系 As 含量, 但降低了茎、叶 As 累积, Se 显著降低了 As 从根系向茎部的转运。

(3) As 胁迫下, Se 显著降低了旱稻叶部 MDA 含量, 显著提高了 As 低吸收品种 V1 叶部 SOD、POD 和 CAT 抗氧化酶活性, 对 As 高吸收品种 V2 抗氧化酶活性, 在低 As 和高 As 胁迫下分别起促进和抑制作用。

(4) 品种低(V1)、高(V2) As 吸收的差异与机制, 体现在 V2 根系 As 吸收及根茎 As 转运远高于 V1, 以及 V2 体内的 MDA 含量、特别是 POD 和 CAT 活性远高于 V1。

参考文献:

- [1] Phan K, Phan S, Heng S, et al. Assessing arsenic intake from groundwater and rice by residents in Prey Veng Province, Cambodia[J]. *Environmental Pollution*, 2014, 185: 84–89.
- [2] 李莲芳, 曾希柏, 白玲玉, 等. 石门雄黄矿周边地区土壤砷分布及农产品健康风险评估[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(11): 2946–2951.
LI Lian-fang, ZENG Xi-bai, BAI Ling-yu, et al. Soil arsenic content and its health risk assessment for agricultural products in the region surrounding Shimen arsenic sulphide mine[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(11): 2946–2951.
- [3] Stroud J L, Norton G J, Islam M R. The dynamics of arsenic in four paddy fields in the Bengal delta[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(4): 947–953.
- [4] 刘文菊, 赵方杰. 植物砷吸收与代谢的研究进展[J]. *环境化学*, 2011, 30(1): 56–62.
LIU Wen-ju, ZHAO Fang-jie. A brief review of arsenic uptake and metabolism in plants[J]. *Environmental Chemistry*, 2011, 30(1): 56–62.
- [5] 赵方杰. 水稻砷的吸收机理及阻控对策[J]. *植物生理学报*, 2014, 50(5): 569–576.
ZHAO Fang-jie. Mechanisms of arsenic uptake by rice and mitigation strategies[J]. *Plant Physiology Journal*, 2014, 50(5): 569–576.
- [6] Kim E J, Yoo J C, Baek K T. Arsenic speciation and bioaccessibility in arsenic-contaminated soils: Sequential extraction and mineralogical investigation[J]. *Environmental Pollution*, 2014, 186: 29–35.
- [7] Bolan N, Mahimairaja S, Kunhikrishnan A, et al. Phosphorus-arsenic interactions in variable-charge soils in relation to arsenic mobility and bioavailability[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 463: 1154–1162.
- [8] Xu X Y, McGrath S P, Meharg A A, et al. Growing rice aerobically markedly decreases arsenic accumulation[J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, 42(15): 5574–5579.
- [9] 丁永祯, 刘潇威, 宋正国, 等. 砷污染稻作区发展旱稻控制稻米砷暴露风险探讨[J]. *农业环境与发展*, 2012, 29(2): 56–60.
DING Yong-zhen, LIU Xiao-wei, SONG Zheng-guo, et al. Discussion on the control of arsenic exposure by planting upland rice in arsenic polluted farmland [J]. *Agro-Environment and Development*, 2012, 29(2): 56–60.
- [10] 谈宇荣, 徐晓燕, 丁永祯, 等. 旱稻吸收砷镉的基因型差异研究[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(8): 1436–1443.
TAN Yu-rong, XU Xiao-yan, DING Yong-zhen, et al. Genotypic variation of arsenic and cadmium uptake by upland rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(8): 1436–1443.
- [11] Rotruck J T, Pope A L, Ganther H E, et al. Selenium: Biochemical role as a component of glutathione peroxidase[J]. *Science*, 1973, 179(4073): 588–590.
- [12] Ding Y Z, Feng R W, Wang R G, et al. A dual role of Se on Cd toxicity: Evidence from plant growth, root morphology and responses of the antioxidative systems of paddy rice[J]. *Plant and Soil*, 2014, 375(112): 289–301.
- [13] Belzile N, Wu G J, Chen Y W, et al. Detoxification of selenite and mercury by reduction and mutual protection in the assimilation of both elements by *Pseudomonas fluorescens*[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 367(2/3): 704–714.
- [14] Mroczek-Zdyrska M, Wójcik M. The influence of selenium on root growth and oxidative stress induced by lead in *Vicia faba* L. minor plants[J]. *Biological Trace Element Research*, 2012, 147(1/2/3): 320–328.
- [15] Feng R W, Wei C Y, Tu S X, et al. Interactive effects of selenium and antimony on the uptake of selenium, antimony and essential elements in paddy-rice[J]. *Plant and Soil*, 2013, 365(1/2): 375–386.
- [16] Malik J A, Goel S, Kaur N, et al. Selenium antagonises the toxic effects of arsenic on mungbean (*Phaseolus aureus* Roxb.) plants by restricting its uptake and enhancing the antioxidative and detoxification mechanisms[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2012, 77: 242–248.
- [17] 胡莹, 黄益宗, 刘云霞. 砷-硒交互作用对水稻吸收转运砷和硒的影响[J]. *环境化学*, 2013, 32(6): 952–958.
HU Ying, HUANG Yi-zong, LIU Yun-xia. Interactions between arsenic and selenium uptake and translocation in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings[J]. *Environmental Chemistry*, 2013, 32(6): 952–958.
- [18] Hu Y, Duan G L, Huang Y Z, et al. Interactive effects of different inorganic As and Se species on their uptake and translocation by rice (*Oryza sativa* L.) seedlings[J]. *Environment Science and Pollution Research*, 2014, 21(5): 3955–3962.
- [19] Liao G J, Xu Y, Chen C, et al. Root application of selenite can simultaneously reduce arsenic and cadmium accumulation and maintain grain yields, but show negative effects on the grain quality of paddy rice[J].

- Journal of Environmental Management*, 2016, 183: 733–741.
- [20] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- LI He-sheng. Principle and technology on physiological and biochemical test of plant[M]. Beijing: Higher Educational Press, 2000.
- [21] 仲维功, 杨杰, 陈志德, 等. 水稻品种及其器官对土壤重金属元素Pb、Cd、Hg、As积累的差异[J]. 江苏农业学报, 2006, 22(4): 331–338.
- ZHONG Wei-gong, YANG Jie, CHEN Zhi-de, et al. Differences in accumulation and distribution of Pb, Cd, Hg and As in rice cultivars and their organs (*Oryza sativa* L.)[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2006, 22(4): 331–338.
- [22] Hu P J, Huang J X, Ouyang Y N, et al. Water management affects arsenic and cadmium accumulation in different rice cultivars[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2013, 35(6): 767–778.
- [23] Li H F, McGrath S P, Zhao F J. Selenium uptake, translocation and speciation in wheat supplied with selenate or selenite[J]. *New Phytologist*, 2008, 178(1): 92–102.
- [24] Meharg A A, Hartley-Whitaker J. Arsenic uptake and metabolism in arsenic resistant and nonresistant plant species[J]. *New Phytologist*, 2002, 154(1): 29–43.
- [25] Zhao X Q, Mitani N, Yamaji N, et al. Involvement of silicon influx transporter OsNIP2; 1 in selenite uptake in rice[J]. *Plant Physiology*, 2010, 153(4): 1871–1877.
- [26] Carey A M, Scheckel K G, Lombi E, et al. Grain accumulation of selenium species in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(10): 5557–5564.
- [27] Liang Y C, Hu F, Yang M C, et al. Antioxidative defenses and water deficit-induced oxidative damage in rice (*Oryza sativa* L.) growing on non-flooded paddy soils with ground mulching[J]. *Plant and Soil*, 2003, 257(2): 407–416.
- [28] 史静, 潘根兴, 夏运生, 等. 镉胁迫对两品种水稻生长及抗氧化酶系统的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(5): 832–837.
- SHI Jing, PAN Gen-xing, XIA Yun-sheng, et al. Effects of Cd on different rice growth and antioxidant enzyme system[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(5): 832–837.
- [29] 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.
- [30] Han D, Xiong S L, Tu S X, et al. Interactive effects of selenium and arsenic on growth, antioxidant system, arsenic and selenium species of *Nicotiana tabacum* L.[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2015, 117: 12–19.
- [31] 谢飞, 王宏宾, 王海娟, 等. 砷胁迫对不同砷富集能力植物叶片抗氧化酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(7): 1379–1385.
- XIE Fei, WANG Hong-bin, WANG Hai-juan, et al. The effect of antioxidant enzyme activity under the As stress on plant leaves of different arsenic enrichment ability[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(7): 1379–1385.