

根分泌物对根际难溶性镉的活化作用及对水稻吸收、运输镉的影响

刘文菊¹, 张西科¹, 张福锁²

(1. 河北农业大学资源环境系, 河北保定 071001; 2. 中国农业大学植物营养系, 北京 100094)

摘要: 采用人工控制光温条件的蛭石-营养液相结合的培养方法, 对根分泌物活化难溶性硫化镉以及对水稻吸收、运输镉的影响进行了研究。结果表明, 缺铁水稻根分泌物和缺铁小麦根分泌物均能活化水稻根际的难溶性镉(CdS), 促进了水稻对这部分镉的吸收和运输; 但二者的活化强度不同, 缺铁小麦根分泌物对镉的活化作用较缺铁水稻根分泌物强。

关键词: 水稻; 根分泌物; 难溶性镉; 活化

The mobilization of root exudates on CdS in rice rhizosphere and their effect on Cd uptake and transport

LIU Wen-Ju¹, ZHANG Xi-Ke¹, ZHANG Fu-Suo² (1. The Department of Land Resource and Environment Protect of AUH, Hebei Baoding 071001, China; 2. The Department of Plant Nutrition of AUC, Beijing 100094, China)

Abstract: The mobilization of wheat and rice root exudates on cadmium sulfide CdS, in rice rhizosphere and their effects on Cd uptake and transport by rice in vermiculite and nutrient solution were investigated. The result showed that the amount of dissolved Cd by the wheat and rice root exudates without Fe treatment was higher than those with Fe treatment. The reason was that they could exudate plenty of PS and PS may chelate Cd to form soluble PS-Cd chelate complex. So the root exudates of rice and wheat without Fe treatment could mobilize insoluble Cd-CdS in rice rhizosphere, and enhance the uptake and transport of Cd. Furthermore, the amount of Cd mobilized by wheat root exudates were significantly higher than that by rice exudates.

Key words: rice; root exudates; CdS; mobilization

文章编号: 1000-0933(2000)03-0448-04 中图分类号: Q945.12 文献标识码: A

随着工农业的发展, 日益增多的污水灌溉、污泥农用、施用含重金属元素的肥料, 无疑加大了土壤中镉等一些重金属元素的含量, 并对生长在这种土壤上的植物产生一定的影响, 而后通过食物链进入人体。近年来, 镉米在我国的许多地区不断出现, 危害了人体健康, 解决这一环境污染问题势在必行。

镉是一种化学性质较为活跃的重金属元素, 易被植物吸收和运输, 且高浓度时毒性较强。镉在土壤中的活性受多种因素的影响, 如 pH 值、Eh 值、根分泌物等。根分泌物对根际微域环境中镉的化学行为有重要作用。研究发现, 禾本科单子叶植物在缺铁胁迫下, 其根系向外分泌的麦根酸类植物铁载体(Phytosiderophore, PS)对 Fe³⁺有极强的络合能力, 而 PS 对 Fe³⁺的络合不是专一的, 它还可与其它的微量金属元素 Cu、Zn、Mn、Co、Ni 进行络合, 提高了根际环境中这些元素的有效性^[1~3]。有人用小麦作实验材料进行研究表明, 缺铁小麦根分泌物能促进植株对溶液中镉的吸收, 这说明 PS 也可与镉络合¹⁾。水稻常年生长在淹水土壤中, 根际以外的土体呈还原状态, 在此状态下的土壤中含有大量的硫化物, 这些硫化物与镉形

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号为 39570427)

收稿日期: 1997-11-15 修订日期: 1998-08-10

1) 李花粉. 根表铁氧化物及植物铁载体对水稻、小麦吸收镉的影响. 1996, 中国农业大学, 博士论文.

成 CdS 沉淀,沉积在土壤中。植物铁载体能否活化难溶性的硫化镉,从而促进镉的吸收,至今有关的报道尚不多见。本试验通过向蛭石培养的水稻中加入根分泌物,探查禾本科植物-水稻、小麦的缺铁根分泌物能否活化蛭石中的难溶性硫化镉,是否能促进水稻植株对根际环境中镉的吸收与运输。

1 材料与方 法

1.1 水稻的蛭石培养及试验处理

水稻种子(*Oryza sativa* L. 品种为 90-90-1)用 30% 的 H_2O_2 浸泡 10min,消毒后用水冲净,播于石英砂中发芽。2 周后移栽到蛭石和 1/5 强度的营养液中培养。本试验设两个处理:CK 和 934mg Cd/kg 蛭石。选择粒度均匀的蛭石,每盆 0.25kg。在进行镉处理的盆钵中加入 0.3g CdS,与蛭石充分混匀后装盆。培养容器选用 1.5L 的塑料盆,每盆移入 20 株水稻幼苗。移栽后全营养液培养 1d,然后进行 +Fe、-Fe 预培养处理,以后定量浇入营养液和不同的外源物质(加铁预培养的水稻植株浇入水+加铁预培养水稻根分泌物+加铁预培养小麦根分泌物;缺铁预培养的水稻植株浇入水+缺铁预培养小麦根分泌物+缺铁预培养水稻根分泌物),保证每盆砂面上有薄水层。每个处理设 3 个重复,处理 4 周后收获。

标准营养液组成 NH_4NO_3 $0.5 \times 10^{-3} \text{mol/L}$; $NaH_2PO_4 \cdot 2H_2O$ $0.6 \times 10^{-4} \text{mol/L}$; K_2SO_4 $0.23 \times 10^{-3} \text{mol/L}$; $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ $0.16 \times 10^{-3} \text{mol/L}$; $CaCl_2$ $0.21 \times 10^{-3} \text{mol/L}$; $MnCl_2 \cdot 4H_2O$ $5.0 \times 10^{-3} \text{mol/L}$; $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$ $5.0 \times 10^{-8} \text{mol/L}$; H_3BO_3 $2.0 \times 10^{-7} \text{mol/L}$; $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ $1.0 \times 10^{-8} \text{mol/L}$; $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ $5.0 \times 10^{-3} \text{mol/L}$; Fe-DETA $1.0 \times 10^{-4} \text{mol/L}$, pH 值调至 5.0。

植物生长条件 保持水稻植株在 30℃、14h 光照和 20℃、10h 黑暗的条件下生长,相对湿度为 60%~70%,光照强度为 $140 \mu\text{mol/m}^2 \cdot \text{s}$ 。

1.2 根分泌物的收集与测定

用来测定和收集根分泌物的水稻、小麦植株栽于容积为 2.2L 的塑料盆中,水稻每盆 50 株,小麦每盆 40 株。每 4d 换 1 次营养液。幼苗移栽后就进行加铁、缺铁预培养处理,小麦生长过程中要通气。缺铁处理 4d 后开始收集分泌物,每 2d 收集 1 次。收集方法是早晨光照 2h 后,将植株从营养液中取出,用去离子水冲洗根系,以除去根表富集的离子,然后放入盛有 600ml 去离子水的器皿中生长 4h(小麦要通气),就得到含有植物铁载体的根洗液。收集完后,将植株再移入原营养液中培养。根据 Takagi 测定方法的原理^[4,5],将其修改后,按以下步骤进行测定:

从根洗液中取 9.00ml 于塑料瓶中,加入 0.50ml、1mM $FeCl_3$ (pH<1.80), 1.00ml 0.5mM NaAc-HAc 缓冲液 (pH=7.0), 振荡 1h 后取出,过滤,向滤液中加入 0.20ml 1.5M H_2SO_4 ; 再从上述溶液中吸取 8.00ml 于另一干净玻璃瓶中,加入 0.50ml 8% $HONH_3Cl$ (盐酸羟胺还原剂) 在 50℃ 下保温 20min; 取出后,再加入 1.00ml 2M HaHAc-HAc 缓冲液 (pH4.7) 和 0.2ml 0.01M Ferrozin, 显色后,在波长为 562nm 处比色测定,记录吸光值。

通过植物铁载体整合铁的数量间接计算 PS 的分泌量,公式如下:

PS 含量 $X(\mu\text{mol/L}) = M_{\tau w} \times 51.48$, 其中 $M_{\tau w}$ 为吸光值, 51.48 为间接计算 PS 分泌量的系数。

1.3 水、营养液、小麦根分泌物对硫化镉的活化

称取 0.3gCdS 于 50ml 塑料瓶中,分别加入水、+Fe、-Fe 营养液、+Fe、-Fe 预培养小麦根分泌物各 50ml(一次收集),振荡 2h,静置 4h 后,过滤,用日立原子吸收分光光度计 Z-8000 测定滤液中镉含量。

1.4 植物样品的分析

将所取植株的根和地上部用去离子水洗净,杀青后于 60℃ 的烘箱中烘干,称完干重后,用玛瑙研钵研碎备用。样品采用干灰化法分析测定。称取一定量的样品,在马福炉中 500℃ 干灰化 10h。过夜冷却后,用 1:30 的硝酸(优级纯)溶解,定容 25ml,过滤。用日立 Z-8000 原子吸收分光光度计测定滤液中镉含量。

2 结果与讨论

2.1 水、小麦根分泌物、营养液对难溶性硫化镉的溶解能力

李花粉^{万芳数据}表明,缺铁小麦根分泌物,特别是其中的植物铁载体可与专性阳离子树脂吸附的镉络合,提高了镉的有效性。这说明 PS 对吸附态镉有活化作用。也有人曾推测,麦根酸也可以活化难溶性的

镉,但至今尚未获得直接的实验证据。本试验分别用水、营养液(+Fe、-Fe)、加铁、缺铁预培养小麦根分泌物对难溶性硫化镉进行浸提,结果表明加铁预培养小麦根分泌物中PS含量为 $2.06\mu\text{mol/L}$,缺铁预培养小麦根分泌物中PS含量为 $15.19\mu\text{mol/L}$,后者明显高于前者,缺铁小麦根分泌物的溶镉量为 422.92mgCd/Kg ,是加铁小麦根分泌物的1.65倍,水的1.79倍,加铁、缺铁营养液的3.54倍、7.81倍(表1)。由此可见,缺铁小麦根分泌物的溶镉量明显高于其它浸提剂对硫化镉的浸提量,说明缺铁小麦根分泌物对硫化镉有很强的活化作用,其中起主要作用的是PS。这可能是由于缺铁小麦根分泌物中的麦根酸类植物铁载体可以与镉整合,从而使硫化镉的溶解度增大,有效性提高。

表1 小麦根分泌物及营养液对难溶性镉溶解量的影响

Table 1 Effect of wheat exudates and nutrient solution on CdS solubility

	水 Water	+Fe 营养液 +Fe nutrient solution	-Fe 营养液 -Fe nutrient solution	+Fe 小麦根分泌物 +Fe wheat root exudates	-Fe 小麦根分泌物 -Fe wheat root exudates
溶镉量(mg/kg) Dissolved Cd amount	236.25 (± 10.69)	119.58 (± 15.44)	54.17 (± 8.52)	257.08 (± 21.08)	422.92 (± 26.98)

2.2 缺铁小麦根分泌物对水稻吸收和运输镉的影响

缺铁小麦根分泌物对硫化镉有很强的活化作用(表1),这势必会影响水稻植株对镉的吸收和运输。本试验对在(蛭石+CdS)中培养的水稻进行小麦加铁、缺铁根分泌物处理,研究结果表明(见表2、图1、图2),收集的加铁小麦根分泌物中植物铁载体总量为 $9.83\mu\text{mol/L}$,缺铁小麦根分泌物中植物铁载体总量为 $64.49\mu\text{mol/L}$,后者明显高于前者。

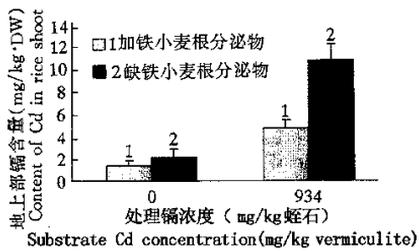


图1 小麦根分泌物对水稻地上部镉含量的影响

Fig. 1 Effect of wheat root exudates on Cd content in rice shoot

+Fe wheat root exudates, 2 -Fe wheat root exudates

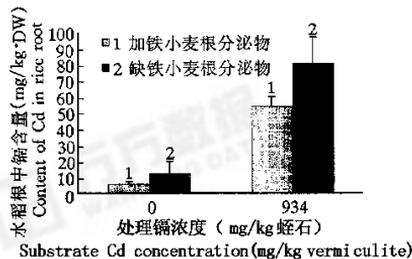


图2 小麦根分泌物对水稻根系吸收镉的影响

Fig. 2 Effect of wheat root exudates on Cd content in rice root

图例同图1 Legend see fig. 1

缺铁小麦根分泌物处理的水稻,其根中镉含量是加铁小麦根分泌物处理植株的1.5倍,说明麦根酸类物质明显促进了镉的吸收;缺铁小麦根分泌物处理的水稻地上部镉含量是加铁小麦根分泌物处理的植株的2.4倍,很明显,植物铁载体和镉整合也促进了水稻对镉的运输。因此,可以推测镉以整合物的形式被吸收后,可能有一部分镉也以这种整合物的形式运输。由图1、图2还可看出,镉被吸收后,主要积累在根部。只有一部分被运至地上部。这可能是由于镉被吸收到根细胞后,大部分与细胞中的蛋白质结合形成稳定的整合物而沉积下来,其余一部分以自由离子和小分子有机络合物如PS-Cd的形式向地上部运输。

2.3 不同处理对水稻吸收和运输镉的影响

PS测定结果表明(表2),处于缺铁胁迫的植物,其根分泌物中铁载体含量明显高于铁营养正常的植株,且缺铁小麦与缺铁水稻根分泌物中植物铁载体含量之间也存在差异,前者明显高于后者。

对加铁和缺铁的水稻植株进行水、加铁水稻根分泌物、加铁小麦根分泌物处理,对缺铁培养的水稻进行水、缺铁水稻根分泌物、缺铁小麦根分泌物处理,结果表明(图3、图4),无论是对照还是镉处理,缺铁培

表 2 收集的不同根分泌物中植物铁载体的总含量*
Table 2 Total contents of phytosiderophore in different collected root exudates

	水 Water	加铁水稻根分泌物 +Fe rice root exudates	缺铁水稻根分泌物 -Fe rice root exudates	加铁小麦根分泌物 +Fe wheat root exudates	缺铁小麦根分泌物 -Fe wheat root exudates
植物铁载体总含量 ^① ($\mu\text{mol/L}$)	6.75 (± 2.62)	7.98 (± 1.06)	17.50 (± 2.95)	9.83 (± 2.01)	64.49 (± 4.21)

* 5 次所收集的根分泌物中植物铁载体的总和; ①The total content of PS.

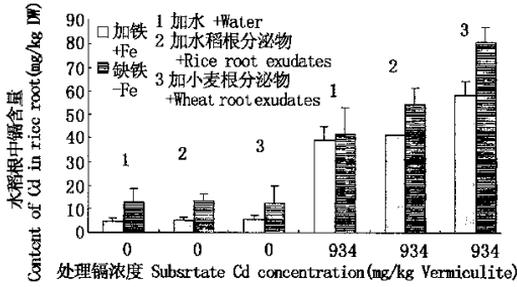


图 3 不同处理对水稻根中镉含量的影响

Fig. 3 Effect of different treatments on Cd content in rice root

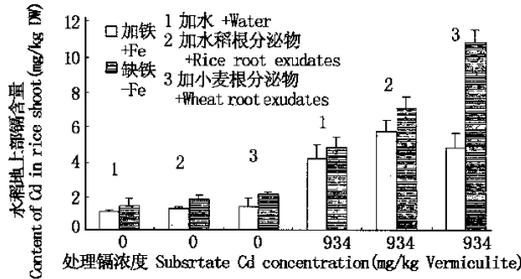


图 4 不同处理对水稻地上部镉含量的影响

Fig. 4 Effect of different treatments on Cd content in rice shoot

养的水稻根与地上部镉含量均高于加铁培养的植株,只是加入的物质不同,差异程度就不同。其中水对不同铁营养状况下的植株根及地上部镉含量影响最小;水稻加铁、缺铁根分泌物处理的植株之间根与地上部镉含量差异较为明显;小麦加铁、缺铁根分泌物处理的水稻植株地上部与根中镉含量差异最为明显,后者远高于前者。这是因为缺铁预培养的水稻、小麦根分泌物中的植物铁载体对硫化镉有活化作用,从而促进了水稻对镉的吸收和运输。由图 3、图 4 还可看出,缺铁条件下,经缺铁小麦根分泌物处理的蛭石培养的水稻根和地上部镉含量高于缺铁水稻根分泌物处理的植株。这是因为在缺铁胁迫下,不同的作物分泌 PS 的数量和持续的时间不同。已有的研究表明,在缺铁胁迫下,水稻分泌 PS 的量少且持续时间短^{[6]①},而小麦分泌 PS 的量且持续时间较长^①。本试验也表明在根分泌物处理整个过程中,缺铁预培养小麦根分泌物中 PS 分泌量是加铁预培养小麦根分泌物的近 7 倍,是缺铁预培养水稻根分泌物中 PS 含量的近 4 倍,这决定了缺铁小麦根分泌物对难溶性硫化镉的活化能力最强,从而对水稻吸收和运输镉的影响最为明显。

参考文献

[1] Murakami T, Ise K, Hayakawa M, et al. Stabilities of metal complexes of mugineic acids and their specific affinities for iron(III). *Chemistry Letters*, 1989, 2137~2140.

[2] 张西科, 张福锁, 毛达如. 根表铁氧化物胶膜对水稻吸收 Zn 的影响. *应用生态学报*, 1996, 7(3): 262~266.

[3] MercKx R, Van GinKel J H, et al. Plant-induced changes in the rhizosphere of maize and wheat II. complexation of Cobalt, Zinc and Manganese in the rhizosphere of maize and wheat. *Plant and Soil*, 1986, 96: 95~107.

[4] Takagi S. Naturally occurring iron-chelating compounds in oat and rice root washings. I Activity measurement and preliminary characterization. *Soil Sci. Plant Nutr.* 1976, 22: 423~433.

[5] Takagi S. Production of phytosiderophores. In: *Iron chelation in plants and soil microorganisms*. Academic Press. Inc., 1993. 111~125.

[6] Mori S, Nishizawa N K and Fujigaki J. Why young rice plants highly susceptible to iron deficiency? Iron nutrition and interactions in plants. Kluwen Academic Publisher, 1991. 175~188.

万方数据

① 宋崇信. 植物铁载体的分泌对禾本科植物适应缺铁胁迫的作用. 1996, 中国农业大学, 硕士论文.