

积累 Cd 油菜吸收 Cd 潜力及其根分泌物对土壤 Cd 的活化

茹淑华，苏德纯，王激清，邢建平

(中国农业大学植物营养系，北京 100094)

摘 要：采用水培和土培试验研究了积累 Cd 油菜溪口花籽的吸收 Cd 潜力及根分泌物对土壤 Cd 的活化效果。结果表明，积累 Cd 油菜溪口花籽和印度芥菜在营养液 Cd 浓度为 1.0 和 1.5 mg · L⁻¹ 时的耐 Cd 毒能力相当。积累 Cd 油菜溪口花籽的吸 Cd 潜力高于印度芥菜。积累 Cd 油菜和印度芥菜在加 Cd 营养液培养条件下的根分泌物对土壤 Cd 均有一定的活化作用。积累 Cd 油菜在营养液中 Cd 浓度为 1.0 mg · L⁻¹ 时收集的根分泌物与 0.5 mmol · L⁻¹ 柠檬酸对土壤 Cd 的提取能力相当。与印度芥菜相比，积累 Cd 油菜根分泌物对土壤 Cd 的提取能力更高。浇入根分泌物对积累 Cd 油菜溪口花籽和印度芥菜体内 Cd 的存在形态没有显著的影响。

关键词：积累 Cd 油菜；吸收；根分泌物；活化

中图分类号：X171.5 **文献标识码：**A **文章编号：**1672 – 2043(2005)01 – 0017 – 05

Uptake of Cadimium by Oilseed Rape Xikou Huazi (*Brassica juncea* L.) and Bioavailability of the Metal in Rhizosphere

RU Shu-hua, SU De-chun, WANG Ji-qing, XING Jian-ping
(Department of Plant Nutrition, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

Abstract: Oilseed rape (*Brassica juncea* L.) Xikou Huazi was selected as a plant to study uptake of cadium in soil using hydroponics and pot trail tests. We have found that oilseed rape Xikou Huazi exhibited phytoremediation potential for Cd contaminated soil. The aim of the present study here was to investigate the potential of Cd uptake by the oilseed rape Xikou Huazi and the Cd mobilization effect of root exudates from it. Hydroponic trial was carried out to investigate the potential of Cd uptake, and acquire root exudates under different Cd treatments in laboratory. Five concentrations of 0, 0.05, 0.5, 1.0, 1.5 mg · L⁻¹ with the pollutant were used in our experiment. The Cd mobilization effect of root exudates from the plant was investigated. In addition, a pot experiment was also conducted under greenhouse condition to evaluate effects of root exudates on Cd forms in the plants grown on a loamy soil that had been artificially fortified by CdSO₄ at 80 mg · kg⁻¹. The results showed that Xikou Huazi and Indian mustard exhibited equivalent Cd toxicity tolerance grown in culture solutions of both 1.0 and 1.5 mg · L⁻¹ Cd. The potential of Cd uptake of Xikou Huazi was much bigger than Indian mustard. The root exudates of both plants under Cd treatment were found to be capable of mobilizing definite Cd from a contaminated calcareous soil. The Cd mobilization effect of root exudates from Xikou Huazi grown in culture solutions of 1.0 mg · L⁻¹ Cd concentration corresponded with 0.5 mmol · L⁻¹ citric acid. None of the plants studied could significantly change the forms in the plants.

Keywords: Cd oilseed rape; uptake; root exudates; mobilization

利用特殊的积累重金属植物去除土壤、水体等介

质中的重金属是近年来新兴的一种绿色、廉价的植物修复技术，目前已成为污染生态学和环境生态学的研究热点。植物修复技术的基础是有适合的超积累植物。超积累植物吸收提取土壤中的重金属过程中，土壤中重金属的植物有效性通常是影响其吸收量多少的限制因素。许多研究发现，植物在受到金属胁迫时根分泌物会增加并影响其对重金属的吸收。Cieslinski 等研究

发现高 Cd 积累小麦品种 (Kyle) 根际土壤中低分子量有机酸显著高于低 Cd 积累小麦品种 (Arcola)^[11]。苏德纯等研究表明印度芥菜根际土壤中的 DTPA 提取 Cd 数量显著高于相同 Cd 浓度土壤条件下的非根际土壤,表明印度芥菜根系分泌物能活化土壤中的难溶态 Cd^[12]。Wenzel 等田间试验结果表明, Ni 超积累植物 *T. goesingense* (遏蓝菜属) 根际的可溶性的有机碳显著增加且土壤溶液中可溶性的有机碳和 Ni 浓度有很好的相关性^[13]。Puschenreiter 等研究表明超积累植物 *Thlaspi caerulescens* (遏蓝菜) 可以活化土壤中的 Zn 和 Cd^[14]。而 Zhao 等报道,在缺 Fe 和缺 Zn 的条件下,超积累 Cd 植物 *Thlaspi caerulescens* 的根分泌物不能提高土壤中的 Cd 活性,与 Cd 的超积累无关^[5]。Chen 等研究表明,萝卜体内的 Cd 主要以氯化钠提取态存在,向土壤中浇入柠檬酸后增加了植物体内去离子水提取态和氯化钠提取态 Cd 的含量,表明柠檬酸处理能促进 Cd 向可移动态转化^[16]。

芥菜型油菜 (*Brassica juncea* L.) 溪口花籽是从我国油菜种质资源中筛选出的积累 Cd 品种,土培试验表明其具有修复 Cd 污染土壤的潜力^[17]。本文通过恒定 Cd 浓度的水培试验,研究 Cd 的植物有效性不成为限制因素的条件下积累 Cd 油菜溪口花籽的吸收累积 Cd 潜力,并与目前公认的 Cd 积累植物印度芥菜比较。同时收集其根分泌物,研究其对土壤中 Cd 的活化作用和对吸收 Cd 的影响,探讨其吸收累积 Cd 的潜力和机制。

1 材料与方法

1.1 供试材料

油菜品种:溪口花籽(代号为 XK)。参比植物:印度芥菜(代号为 IN)。

标准营养液组成 ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$): $0.5 \times 10^{-3} \text{ K}_2\text{SO}_4$; $0.25 \times 10^{-3} \text{ KH}_2\text{PO}_4$; $0.325 \times 10^{-3} \text{ MgSO}_4$; $5.0 \times 10^{-4} \text{ NaCl}$; $8.0 \times 10^{-6} \text{ H}_3\text{BO}_3$; $1.0 \times 10^{-6} \text{ MnSO}_4$; $0.4 \times 10^{-6} \text{ ZnSO}_4$; $0.4 \times 10^{-6} \text{ CuSO}_4$; $0.1 \times 10^{-6} \text{ Na}_2\text{MoO}_4$; $4.0 \times 10^{-6} \text{ Fe-EDTA}$; $1.0 \times 10^{-3} \text{ CaSO}_4$; $1.0 \times 10^{-3} \text{ NH}_4\text{NO}_3$

盆栽试验用土壤采自中国农业大学科学园。土壤的基本性质:土壤质地为中壤土, pH 值(水与土为 5:1)为 7.66,土壤阳离子交换量为 $20.1 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,有机碳含量为 1.26%,全 Cd 含量为 $0.06 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效 Cd(DTPA-Cd) $0.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验方法

1.2.1 水培试验

油菜设 5 个 Cd 浓度,分别为 0、0.05、0.5、1.0、 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,印度芥菜设 4 个 Cd 浓度,分别为 0、0.5、1.0、 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,每个处理重复 3 次。用自来水将蛭石冲洗干净后播种,在温度为 $25^\circ\text{C} \sim 28^\circ\text{C}$ 的温室内培养 3 周后,将大小一致的幼苗转移至盛有 1 L 营养液的瓷盆中,每盆 4 株。每天平均光照 14 h, 24 h 连续通气。每隔 3 d 换一次营养液,预培养 6 周后,进行 Cd 处理,2 周后收集根分泌物,共收集 2 次。

根分泌物的收集方法:上午 10:00,将植株从营养液中取出,小心用清水轻洗根系上附着的养分离子,再用去离子水洗根,然后将植株根放入盛有 200 mL 去离子水的塑料盆中,连续通气培养 4 h 后,小心取出根系放回营养液中。然后将根分泌物收集液转移到 200 mL 的储存瓶中,保存在 -20°C 下的低温冰柜中备用。

1.2.2 根分泌物对油菜吸 Cd 及体内 Cd 形态的影响

试验采用温室土培盆栽试验,土壤 Cd 浓度设 $80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,把相应量的 CdSO_4 配成溶液,分别与过 2 mm 筛土壤反复混合均匀,然后在温室中稳定 1 周,并混入底肥,底肥用量分别为每千克土加 $\text{N } 0.30 \text{ g}$ 、 P_2O_5 0.20 g 、 $\text{K}_2\text{O } 0.30 \text{ g}$,施入形态分别为 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 KH_2PO_4 、 K_2SO_4 ,然后在温室中稳定 1 周后装盆,每盆装土 500 g,待油菜溪口花籽和印度芥菜出苗后,每盆留苗 4 株,生长过程中用自来水浇灌,每天 1~2 次。待植株生长 30 d 后,对于印度芥菜和溪口花籽设浇入各自等量的水培试验中营养液 Cd 浓度为 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理下收集的根分泌物溶液,并设对照为浇入清水,每个处理重复 3 次。处理 1 周后收获,然后进行植株体内 Cd 浓度和 Cd 形态的分析。

1.2.3 根分泌物对土壤中 Cd 的活化试验

采用 Cd 浓度为 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Cd 污染土壤,土样风干,过 20 目筛,分别用蒸馏水(对照)、不同浓度 Cd 胁迫下油菜和印度芥菜的根分泌物、 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 柠檬酸、 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 草酸提取土壤中的 Cd,重复 3 次,准确称取 1.00 g Cd 污染土壤放入振荡瓶中,分别加入以上提取液 20 mL,室温 25°C ,振荡 3 h,过滤,用石墨炉测定清液中 Cd 的浓度。

1.3 植株分析

1.3.1 体内 Cd 含量的分析

用刀子将植株的地上部与根分开,在 70°C 下烘干,称取地上部的干重。植株样品用 $\text{HNO}_3 - \text{HClO}_4$ 消化,然后用原子吸收光谱法测定样品中的 Cd 含量。

1.3.2 体内 Cd 的化学形态分析

用逐步提取法研究油菜体内 Cd 的存在形态。采用鲜样,将植株的地上部洗净,将茎和叶片分开,再将叶片剪成 $1 \sim 2 \text{ mm}^2$ 的碎片,备形态提取用。准确称取 2.000 g 油菜地上部新鲜样品,置于 50 mL 的三角瓶中,加入 37.5 mL 提取剂,在 30°C 恒温箱中放置过夜 ($17 \sim 18 \text{ h}$),次日回收提取液,再加入同样体积该提取液,浸取 2 h 后,再回收提取液,重复 2 次,即在 24 h 内提取 4 次,集 4 次提取液 (共 150 mL) 于 200 mL 的三角瓶中。

所采用的提取剂及提取顺序为: 80% 乙醇、去离子水、 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl}$ 溶液、 2% 醋酸、 $0.6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐酸。

Cd 的测定:将盛有提取液的三角瓶放置于电热板上蒸发近干后,用 $\text{HNO}_3 - \text{HClO}_4$ 进行消化,然后转移至 25 mL 的容量瓶中,用 10% 硝酸定容,过滤后分别用 ICP 和原子吸收光谱法测定 Cd 含量。

2 结果与讨论

2.1 水培条件下积累 Cd 油菜吸收 Cd 的潜力

图 1 为不同 Cd 浓度营养液中油菜和印度芥菜地上部生物量的变化规律。从图 1 可以看出,随营养液中 Cd 浓度的增加,积累 Cd 油菜和印度芥菜地上部生物量均呈下降趋势。通过对积累 Cd 油菜和印度芥菜的地上部生物量与营养液中 Cd 浓度的关系用数学模型模拟,发现二者符合二次型曲线模型。检验结果表明二者之间的相关性都没有达到显著水平。在营养液 Cd 浓度为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,油菜溪口花籽和印度芥菜地上部生物量分别下降了 24% 、 5% ;在营养液 Cd 浓度为 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时分别下降了 29% 、 30% ;在营养液 Cd 浓度为 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时分别下降了 29% 、 33% 。由此可以看出油菜溪口花籽在营养液 Cd 浓度为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时生物量已开始明显下降,而印度芥菜的生物量没有明显变化。这说明在营养液 Cd 浓度为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,印度芥菜具有更高的耐性。而油菜溪口花籽和印度芥菜在营养液 Cd 浓度为 1.0 和 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时耐 Cd 毒的能力相当。

图 2 为不同 Cd 浓度营养液中油菜和印度芥菜地上部 Cd 含量的变化规律。从图 2 可以看出油菜溪口花籽和印度芥菜地上部 Cd 含量随营养液中 Cd 浓度的增加呈抛物线增加的趋势。通过对油菜和印度芥菜的地上部 Cd 含量与营养液中 Cd 浓度的关系用数学模型模拟,发现二者符合二次型曲线模型。检验结果表明二者之间的相关性都达到显著水平。在营养液

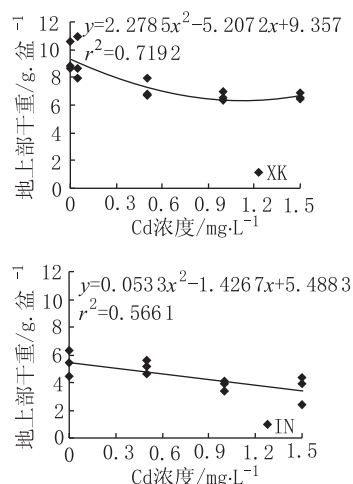


图 1 不同 Cd 浓度营养液中油菜和印度芥菜地上部生物量
Figure 1 Shoot dry weight of the oilseed rape and Indian mustard grown in different Cd concentrations of aquatic solution

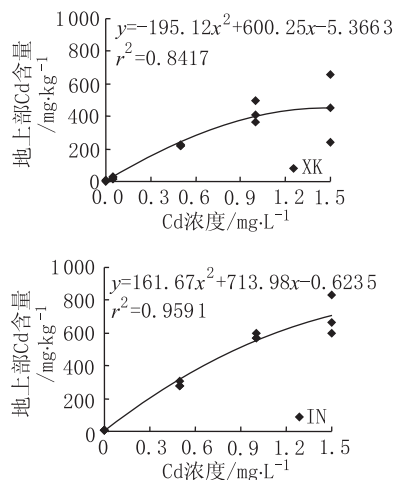


图 2 不同 Cd 浓度营养液中油菜和印度芥菜地上部 Cd 含量
Figure 2 Shoot Cd concentrations of oilseed rape and Indian mustard grown in different Cd concentrations of aquatic solution ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Cd 浓度为 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,积累 Cd 油菜和印度芥菜地上部 Cd 含量分别为 399.8 和 $551.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;在营养液 Cd 浓度为 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时分别为 456.0 和 $706.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。由此可见在相同营养液 Cd 浓度条件下,印度芥菜地上部 Cd 含量高于油菜溪口花籽。

图 3 为不同 Cd 浓度营养液中油菜和印度芥菜地上部吸 Cd 量的变化规律。从图 3 可以看出,油菜溪口花籽和印度芥菜地上部吸 Cd 量随营养液中加入 Cd 含量的增加呈抛物线增加的趋势。通过对油菜和印度芥菜的地上部吸 Cd 量与营养液中含 Cd 量的关系分别用数学模型模拟,发现二者分别符合二次型曲线模型。检验结果表明油菜的地上部吸 Cd 量与营养液中含 Cd 量之间的相关性达到显著水平,而印度芥菜的地上

部吸 Cd 量与营养液中含 Cd 量之间的相关性没有达到显著水平。在营养液 Cd 浓度为 $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 积累 Cd 油菜和印度芥菜地上部吸 Cd 量分别为 $2\,687.0\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$ 和 $2\,237.0\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$; 在营养液 Cd 浓度为 $1.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时分别为 $2\,994.9\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$ 和 $2\,479.0\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$ 。在营养液 Cd 浓度为 1.0 和 $1.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时积累 Cd 油菜地上部吸 Cd 量均明显高于印度芥菜。由以上可知尽管在营养液 Cd 浓度为 1.0 和 $1.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 积累 Cd 油菜的地上部 Cd 含量明显低于印度芥菜, 但是由于积累 Cd 油菜的地上部生物量明显高于印度芥菜而使其吸 Cd 量高于印度芥菜。植物修复的效益决定于植物地上部的总吸收量, 因此积累 Cd 油菜溪口花籽的吸 Cd 潜力高于印度芥菜。

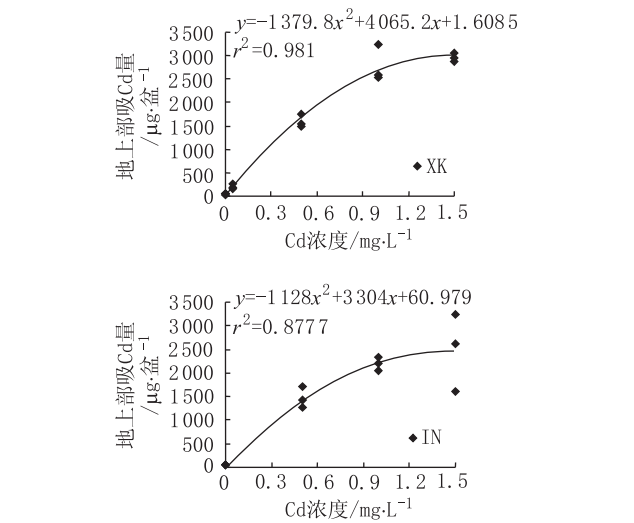


图 3 不同 Cd 浓度营养液中油菜和印度芥菜地上部吸 Cd 量
Figure 3 Shoot Cd uptake of oilseed rape and Indian mustard grown in different Cd concentrations of aquatic solution ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

2.2 油菜和印度芥菜根分泌物对土壤中 Cd 的活化

图 4 为油菜溪口花籽和印度芥菜在不同 Cd 浓度营养液条件下收集的根分泌物对污染土壤 Cd 的活化效果。

从图 4 可以看出, $0.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 柠檬酸、油菜溪口花籽在营养液 Cd 浓度分别为 0.5 、 1.0 和 $1.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时收集的根分泌物及印度芥菜在营养液 Cd 浓度分别为 0.5 和 $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时收集的根分泌物对土壤 Cd 的提取能力均显著高于对照。这说明油菜和印度芥菜在营养液中加入 Cd 条件下的根分泌物对土壤 Cd 均有一定的活化作用。

由图 4 可知, 油菜溪口花籽在营养液中 Cd 浓度为 $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时收集的根分泌物与 $0.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 柠檬酸对土壤 Cd 的提取能力相当。二者均显著高于

$0.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 草酸及油菜溪口花籽和印度芥菜在营养液其他 Cd 浓度条件下的根分泌物对土壤 Cd 的提取能力。这说明与根分泌物中常见的有机酸柠檬酸一样, 油菜在营养液 Cd 浓度为 $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时收集的根分泌物对土壤 Cd 也具有较高的活化作用。从图 4 还可以看出, 在相同 Cd 含量条件下油菜溪口花籽的根分泌物从土壤中溶出 Cd 的能力均显著高于印度芥菜。这表明与印度芥菜相比, 油菜溪口花籽根分泌物对土壤 Cd 的提取能力更高。

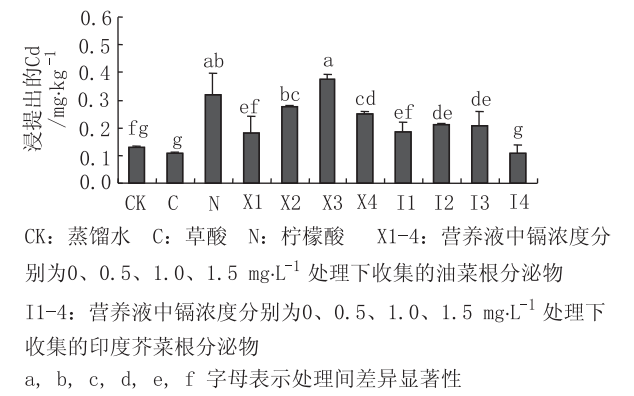


图 4 油菜和印度芥菜根分泌物对土壤 Cd 的活化效果
Figure 4 Bioavailability of Cd in rhizosphere of soils with oilseed rapeseed and Indian mustard

2.3 根分泌物对积累 Cd 油菜和印度芥菜体内 Cd 存在形态的影响

重金属 Cd 在植物体内以不同形态存在, 用不同的提取剂可将各形态的 Cd 分别提取出来。作物体内 Cd 的化学形态特征与表观毒性效应有密切联系。杨居荣等把植物体内的 Cd 分成乙醇提取态 (F_E)、去离子水提取态 (F_W)、氯化钠提取态 (F_{NaCl})、醋酸提取态 (F_{HAC})、盐酸提取态 (F_{HCl}) 和残渣态 (F_r)。其中去离子水提取水溶性的有机盐、重金属的一代磷酸盐等; 氯化钠溶液提取果胶酸盐, 与蛋白质结合态或吸着态 Cd 等; 醋酸提取难溶于水的重金属磷酸盐, 包括二代磷酸盐、正磷酸盐等; 盐酸提取 Cd 的草酸盐等^[8]。

表 1 为浇入水培试验条件下营养液 Cd 浓度为 $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理时收集的根分泌物后油菜和印度芥菜体内各 Cd 存在形态的含量。由表 1 知在相同处理条件下, 积累 Cd 油菜体内去离子水提取态的 Cd 含量显著地高于印度芥菜。但是, 与对照浇入清水相比, 浇入根分泌物对积累 Cd 油菜和印度芥菜体内乙醇提取态、去离子水提取态、氯化钠提取态、醋酸提取态、盐酸提取态和残渣态 Cd 的含量均没有显著的影响。其原因是: 尽管从 2.2 知, 在营养液 Cd 浓度为 1.0

表 1 浇入根分泌物后油菜和印度芥菜体内各 Cd 存在形态的含量(mg · kg⁻¹)

Table 1 Effects of root exudation treatment on Cd chemical forms in oilseed rape and Indian mustard(mg · kg⁻¹)

品种	处理	F _E	F _W	F _{NaCl}	F _{HAC}	F _{HCl}	F _r
溪口花籽	浇清水	0.30a	5.69a	8.40a	8.05a	0.10a	0.02a
	浇根分泌物	0.22a	5.15ab	8.31a	7.60a	0.08a	0.01a
印度芥菜	浇清水	0.34a	3.95bc	6.98a	7.07a	0.10a	0.02a
	浇根分泌物	0.38a	3.42c	6.88a	7.53a	0.11a	0.01a

注:①应用 *LSD* 法检验不同处理间的差异程度,同一列中无共同字母者表示差异达到 5% 显著水准;②表中油菜和印度芥菜体内各 Cd 存在形态的含量是采用新鲜样品测定的结果。

mg · L⁻¹ 处理时收集的油菜溪口花籽和印度芥菜的根分泌物对土壤 Cd 均有一定的活化作用,但是根分泌物对土壤 Cd 的溶解是一个简单的化学过程,根分泌物中的低分子量有机酸可以将土壤中的 Cd 溶解进入土壤溶液,而植物吸收是一个复杂的生物过程,被根分泌物溶解出的 Cd 不可能立即被植物吸收,离子态的 Cd 在土壤中很可能会逐渐转化为难于被植物吸收利用的形态。

3 小结

(1) 积累 Cd 油菜溪口花籽和印度芥菜在营养液 Cd 浓度为 1.0 和 1.5 mg · L⁻¹ 时耐 Cd 毒能力相当。积累 Cd 油菜溪口花籽的吸 Cd 潜力高于印度芥菜。

(2) 积累 Cd 油菜溪口花籽在营养液 Cd 浓度为 1.0 mg · L⁻¹ 时收集的根分泌物与 0.5 mmol · L⁻¹ 柠檬酸对土壤 Cd 的提取能力相当。与印度芥菜相比,积累 Cd 油菜溪口花籽根分泌物对土壤 Cd 的提取能力更高。浇入根分泌物对积累 Cd 油菜溪口花籽和印度芥菜体内 Cd 存在形态没有显著的影响。

参考文献:

[1] Cieslinski G, Van Rees K C J, Szmigielska A M. Low – molecular –

weight organic acids in rhizosphere soils of durum wheat and their effect on cadmium bioaccumulation[J]. *Plant and Soil*, 1998, 203(1): 109 – 117.

[2] 苏德纯,黄焕忠,张福锁. 印度芥菜对土壤中难溶态镉的吸收及活化机制研究[J]. *中国环境科学*, 2002, 22(4): 342 – 345.

[3] Wenzel W W, Bunkowski M, Puschenreiter M, et al. Rhizosphere characteristics of indigenously growing nickel hyperaccumulator and excluder plants on serpentine soil[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 123(1): 131 – 138.

[4] Puschenreiter M, Wiecezorek S, Horak O, et al. Chemical changes in the rhizosphere of metal hyperaccumulator and excluder *Thlaspi* species[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2003, 166(5): 579 – 584.

[5] Zhao F J, Hamon R E, McLaughlin M J. Root exudates of the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* do not enhance metal mobilization[J]. *New Phytologist*, 2001, 151(3): 613 – 620.

[6] Chen Y X, Lin Q, Luo Y M, et al. The role of citric acid on the phytoremediation of heavy metal contaminated soil[J]. *Chemosphere*, 2003, 50(6): 807 – 811.

[7] 苏德纯,黄焕忠. 油菜作为超积累植物修复镉污染土壤的潜力研究[J]. *中国环境科学*, 2002, 22(1): 48 – 51.

[8] 杨居荣,贺建群,张国祥,等. 农作物对毒害的耐性机理探讨[J]. *应用生态学报*, 1995, 6(1): 87 – 91.