

2 种基因型菜心根系分泌物对水稻土中 DEHP 解吸效应的初步研究

曾巧云^{1,3}, 莫测辉², 文荣联¹, 蔡全英¹

(1.华南农业大学资源环境学院, 广州 510642; 2.暨南大学环境工程系, 广州 510632; 3.农业部生态农业重点开放实验室, 广州 510642)

摘 要:在邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(DEHP)不同污染水平下水培油青 60 天菜心和特青 60 天菜心,采用蒸馏水法收集根系分泌物,研究其根系分泌物对水稻土壤中 DEHP 解吸效应的影响及其与菜心吸收累积 DEHP 的关系。结果表明,2 种基因型菜心根系分泌物均能显著提高土壤中 DEHP 的解吸效应,添加根系分泌物处理上清液中 DEHP 含量是对照处理的 1.9~26.6 倍,较高污染条件下 2 种基因型菜心根系分泌物对土壤中 DEHP 具有更强的解吸效应。油青 60 天菜心根系分泌物的解吸效应大于特青 60 天菜心,前者是后者的 1.6~4.6 倍。2 种基因型菜心根系分泌物对土壤中 DEHP 的解吸效应强弱与其根系、茎叶中 DEHP 含量达极显著相关($r \geq 0.9249$),说明 2 种基因型菜心根系分泌物对 DEHP 解吸效应的影响可能是导致其根系、茎叶中 DEHP 含量差异的重要原因之一。

关键词:菜心;根系分泌物;解吸;DEHP 污染;土壤

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)08-1466-05

A Preliminary Study on the Effects of Two Genotypes of *Brassica parachinensis* Root Exudates on DEHP Desorption in Paddy Soil

ZENG Qiao-yun^{1,3}, MO Ce-hui², WEN Rong-lian¹, CAI Quan-ying¹

(1. College of Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Department of Environmental Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 3. Key Laboratory of Ecological Agriculture of Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, Guangzhou 510642, China)

Abstract: The root exudates of two genotypes of *Brassica parachinensis*, DEHP high-accumulating Youqing-60 and low-accumulating Teting-60 which were cultivated in hydroponic systems contaminated with DEHP ($20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) were collected by sterilized distilled water at 15th and 30th day to investigate their effects on the desorption of DEHP in paddy soil and on the accumulation of DEHP in root and shoot of two genotypes of *Brassica parachinensis*. The results showed that DEHP concentrations in supernatant of treatments added root exudates were higher than that added distilled water (1.9~26.6 times), indicating that root exudates of two genotypes of *Brassica parachinensis* improved significantly DEHP desorption in paddy soil. With the increase of DEHP concentrations in hydroponic systems, the effects of both two genotypes of *Brassica parachinensis* root exudates on DEHP desorption in paddy soil increased, and significant differences were observed between some treatments. DEHP concentrations in supernatant of treatments added Youqing-60 root exudates were higher by 0.6~3.6 times than those added Teting-60 root exudates. Moreover, DEHP concentrations in supernatant of treatments added root exudates at 15th day were higher than those at 30th day (except the treatment of DEHP $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ of Teting-60), implying that the effects of root exudates on DEHP desorption at early grow stage were higher than at late grow stage. Significant correlation ($r \geq 0.9249$) was observed between DEHP concentrations in supernatant of treatments added two genotypes of *Brassica parachinensis* root exudates and DEHP contents in root and shoot. It was therefore concluded that higher desorption of DEHP in soil might be an important mechanism which resulted in significantly higher DEHP accumulation in Youqing-60 than in Teting-60.

Keywords: *Brassica parachinensis*; root exudates; desorption; DEHP pollution; soil

收稿日期:2010-04-07

基金项目:国家自然科学基金(30600372,30471007);广东省科技计划项目(2003C34505,2008B080701012)

作者简介:曾巧云(1974—),女,主要从事环境有机污染与控制方面的研究工作。E-mail:qiaoyunzeng@126.com

通讯作者:莫测辉 E-mail:tchmo@jnu.edu.cn

邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(DEHP)主要用作聚氯乙烯的增塑剂。由于聚氯乙烯制品的大量生产与广泛应用,从而 DEHP 在环境中普遍检出。已有研究表明 DEHP 可以致癌并具有较强的生殖毒性,DEHP 已被列入许多国家优控污染物名单。土壤中 DEHP 对微生物、酶以及植物的生长具有一定的影响^[1-3],同时还在植物中具有一定的累积效应^[3-6]。植物对土壤中 DEHP 的吸收累积不仅种间存在差异,而且存在种内差异^[5-6]。目前关于植物对邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(DEHP)吸收机理的研究鲜有报道。

根系分泌物是植物在生长过程中根系向生长介质分泌质子、离子和大量有机物质的总称^[7]。根系分泌物对土壤有机污染物的环境行为的影响作用有三:首先,根系分泌物中的水溶性有机碳物质等可以增加土壤有机污染物的水溶性,从而提高有机污染物的生物有效性^[8]。其次,根系分泌物为根际微生物提供能源和碳源,促进有机污染物的微生物降解^[9]。第三,根系分泌物中一些酶类能直接降解有机污染物^[10]。不同植物种类或同类植物不同基因型根系分泌物在数量和种类上均存在很大差异^[11],其对土壤有机污染物的环境行为的影响也存在差异。同时,污染等逆境胁迫下植物往往会通过调节生理生化来适应不利的生长环境,其根系分泌物的数量和种类也会发生改变^[12-14],从而影响土壤有机污染物的生物有效性。因此,研究不同植物类型或同类植物不同基因型根系分泌物对土壤有机污染物生物有效性的影响,对于明确有机污染物在土壤-植物系统中的环境行为以及有机污染土壤的植物修复具有重要学术意义和实践意义。本文针对前期筛选出的 DEHP 高吸收累积基因型菜心(油青 60 天菜心)和 DEHP 低吸收累积基因型菜心(特青 60 天菜心),通过研究 DEHP 不同污染水平下培养 2 种基因型菜心根系分泌物对土壤中 DEHP 的解吸效应,初步揭示两种基因型菜心吸收累积 DEHP 差异的机理。

1 材料与方法

1.1 试验材料和培养方法

采用溶液培养方法,以我们前期筛选出的 DEHP 高吸收累积基因型菜心油青 60 天菜心和 DEHP 低吸收累积基因型菜心特青 60 天菜心^[5]为供试植物,种子购自广东省农业科学研究院。培养液中 DEHP 的设置浓度既要考虑 DEHP 的实际污染情况和保证菜心的正常生长,又要在研究上体现差异。在我们的前期研

究基础上,培养液中 DEHP(分析纯,天津试剂二厂)设置 2 个污染水平($20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, T1; $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, T2)和对照处理(T0,未添加 DEHP),各处理 4 个重复,随机排列。培养液的基本组成见文献[15]。

溶液培养试验于华南农业大学资源环境学院网室中进行。选择饱满一致的种子,播于装有经 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl 处理过的石英砂育苗杯中,在遮光条件下进行发芽。发芽 3 d 后用 50%浓度的培养液培养,1 星期后培养液浓度由 50%提高至 100%。菜心长到 3 片真叶时移至配制好 DEHP 污染浓度的 100%培养液中,每盆移植 4 株幼苗。每盆培养液的体积为 6.0 L,培养液每日定期搅拌通气以保证植株供氧量和 DEHP 的均匀分布。每日用 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl 或 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH 调节各处理培养液的 pH 值,使其保持在 6.2~6.5 之间。水培 50 d 后收获植物,由基部剪切分别收集茎叶和根系,用自来水和去离子水洗净后备用。

1.2 根系分泌物的收集

菜心根系分泌物的收集采用蒸馏水收集法。分别在溶液培养试验的第 15 d 和 30 d 上午 9:00 开始,用蒸馏水清洗菜心根部 3~5 次,然后用滤纸吸干根表面水分,将洗净的菜心根系转移至装有 500 mL 灭菌蒸馏水的烧杯内(每个烧杯 2 株长势一致的菜心),烧杯的外壁用两层黑色塑料薄膜包住,收集 6 h,设 4 次重复。然后 40°C 下真空旋转蒸发浓缩至 100 mL, -20°C 冷藏备用。

1.3 根系分泌物对土壤中 DEHP 解吸效应的室内模拟试验

根系分泌物对土壤中 DEHP 解吸效应的室内模拟试验采用风干水稻土,取自华南农业大学试验农场,其 DEHP 含量为 $6.3025 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 为 5.86,有机质含量为 $13.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮、全磷和全钾含量分别为 1.00 、 $1.38 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $32.16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。粒径 $0.05\sim 2 \text{ mm}$ 占 36%、粒径 $0.01\sim 0.05 \text{ mm}$ 占 16%、粒径 $<0.01 \text{ mm}$ 占 48%。取一定量的 DEHP(分析纯)溶于丙酮溶液,加入过 2 mm 筛的水稻土,配制 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ DEHP 污染土壤,在阴凉处放置 3 d,每日翻拌 3 次,让丙酮挥发。将上述备好的根系分泌物浓缩液转移至具塞玻璃离心管中,加入配制好的 DEHP 污染土壤 20.00 g(根系分泌物浓缩液:土壤=5:1),加盖密封。同时,将加入 100 mL 灭菌蒸馏水和 20.00 g DEHP 的污染土壤设置为对照处理(CK)。25 $^\circ\text{C}$ 恒温避光条件下以 $120 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 振荡 12 h,然后以 $3500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min,取出上清液,获得待分析样品。

1.4 样品预处理及DEHP检测的GC/MS工作条件

植物样品的预处理采用索氏抽提方法,参考US EPA 3540方法,具体步骤见文献[5]。解吸试验上清液样品的预处理参照水样,采用氧化铝柱净化方法,参考US EPA 3610方法,具体步骤见文献[16]。DEHP的检测方法采用GC/MS联机检测方法,参考USEPA 8270C方法。定量分析用DEHP、内标化合物(菲- d_{10} 、茈- d_{10})和代用品标准物质(苯胺- d_5)为色谱纯标准物,购自美国ULTRA Scientific, Inc., North Kingstown; RI。采用标样的0.0、2.5、5.0、7.5、10.0 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 为工作曲线,内标法定量。苯胺- d_5 的回收率为82.69%~90.25%,DEHP的检测限为0.491 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,空白试验中未检测出目标化合物。

1.5 数据处理

本文的结果数据为4次重复的平均值,用新复极差法(Duncan)进行多重比较。数据的统计分析均在Microsoft Excel和SAS 8.1软件上进行。

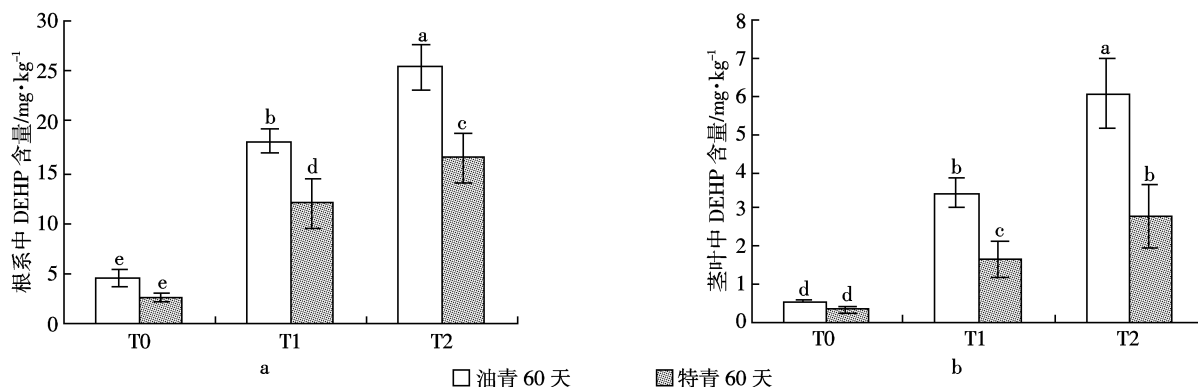
2 结果与分析

2.1 两种基因型菜心根系和茎叶中DEHP的含量特征

两种基因型菜心根系和茎叶中DEHP的含量均随着培养液中DEHP浓度的升高而显著增加,油青60天菜心根系和茎叶中DEHP的含量均显著高于特青60天菜心(图1)。溶液培养试验两种供试植物根系和茎叶中DEHP的含量均显著高于对应污染水平的土培试验^[9],与Newman等^[17]的研究结果一致,可能与土壤吸附作用^[18-19]导致污染物的生物有效性降低有关。

2.2 溶液培养第15 d和第30 d两种基因型菜心根系分泌物对土壤中DEHP的解吸特征

DEHP污染溶液培养第15 d和第30 d的两种基因型菜心根系分泌物对土壤中DEHP的解吸特征见图2。对于DEHP污染溶液培养第15 d(图2a),添加两种基因型菜心根系分泌物处理上清液中DEHP的含量均高于对照处理(CK),相差达3.2~27.6倍。在本



图中数据为平均数据($n=4$);标有相同字母者差异不显著($P>0.05$)。下同。

Means($n=4$) followed by the same letters are not significantly different($P>0.05$). The same below.

图1 两种基因型菜心根系(a)和茎叶(b)中DEHP的含量

Figure 1 Concentrations of DEHP in roots(a) and shoots(b) of two genotypes of *Brassica parachinensis*

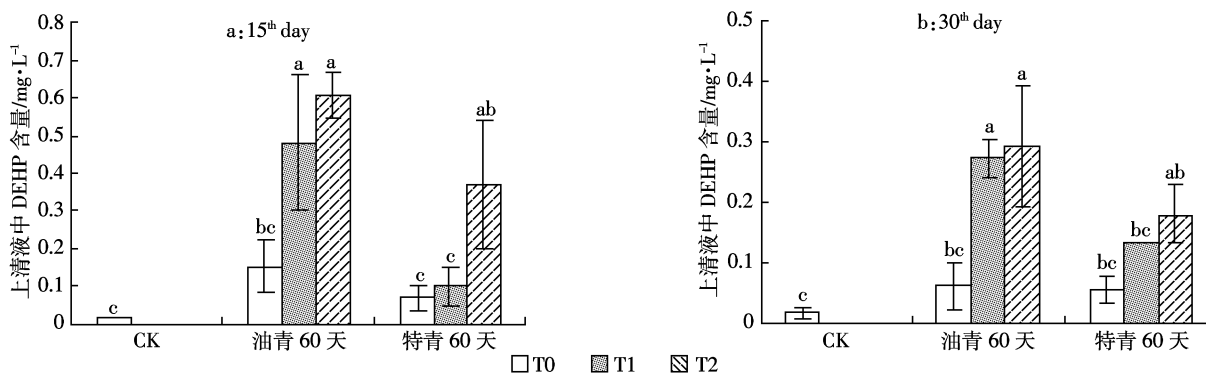


图2 两种基因型菜心第15 d和第30 d根系分泌物对土壤中DEHP的解吸特征

Figure 2 The effects of root exudates from two genotypes of *Brassica parachinensis* cultivated 15th day(a) and 30th day(b) on DEHP desorption

试验中,较高 DEHP 污染条件下所培养的菜心根系分泌物对土壤中 DEHP 的解吸效应更强,即上清液中 DEHP 的浓度大小顺序均为 $T_2 > T_1 > T_0$,其中油青 60 天菜心 T_1 和 T_2 处理显著高于 T_0 处理,特青 60 天菜心 T_2 处理显著高于 T_0 和 T_1 处理。添加油青 60 天菜心根系分泌物处理上清液中 DEHP 的含量高于特青 60 天菜心,前者是后者的 1.6~4.6 倍,且 T_1 处理差异显著。

DEHP 污染溶液培养第 30 d 的两种基因型菜心根系分泌物对土壤中 DEHP 的解吸特征(图 2b)与第 15 d 的解吸特征相似。添加两种基因型菜心根系分泌物处理上清液中 DEHP 含量均高于对照处理(CK),相差达 2.9~14.7 倍。在本试验设计中,较高 DEHP 污染条件下所培养的菜心根系分泌物对土壤中 DEHP 的解吸效应更强,即上清液中 DEHP 的浓度大小顺序均为 $T_2 > T_1 > T_0$,其中油青 60 天菜心 T_1 和 T_2 处理显著高于 T_0 处理,特青 60 天菜心 T_2 处理显著高于 T_1 和 T_0 处理。添加油青 60 天菜心根系分泌物处理上清液中 DEHP 含量高于特青 60 天菜心,前者是后者的 1.1~2.1 倍,且 T_1 处理差异显著。

对比图 2a 和图 2b 可以看出,对应污染水平下,油青 60 天菜心第 15 d 根系分泌物处理上清液中 DEHP 含量大于第 30 d 根系分泌物处理,前者是后者的 1.8~2.4 倍。特青 60 天菜心 T_0 和 T_2 处理第 15 d 根系分泌物处理上清液中 DEHP 含量大于第 30 d 根系分泌物处理,前者分别是后者的 1.2~2.0 倍;而 T_1 处理第 15 d 根系分泌物处理上清液中 DEHP 含量小于第 30 d 根系分泌物处理,前者是后者的 78.79%。

3 讨论

有机污染物一般具有较高的辛醇-水分配系数,容易吸附于沉积物和土壤颗粒物上而导致其生物有效性降低^[18-19]。植物根系分泌物对土壤中有机污染物的环境行为具有影响,如南瓜、甜瓜等植物能分泌一种能与 2,3,7,8-TCDD(四氯二苯并-p-二噁英)等有机污染物结合并增强其水溶性的物质,从而提高其被植物吸收、转运的能力^[8]。Luo^[20]也发现玉米、小麦和黑麦草根分泌物能促进 DDT 从土壤中解吸出来,从而增加其在土壤中的生物有效性。本文添加两种基因型菜心根系分泌物处理上清液中 DEHP 含量均显著高于对照处理,说明两种基因型菜心根系分泌物均能促进土壤中 DEHP 的解吸。其中油青 60 天菜心根系分泌物对土壤中 DEHP 的解吸效应大于特青 60 天菜

心。两种基因型菜心根系分泌物促进土壤中 DEHP 解吸的机理有待进一步研究。

植物可以通过调节生理生化过程来适应生长环境的变化,其根系分泌物的种类与数量会发生相应改变。PCOPs 低污染浓度下促进植物根系分泌可溶性总糖、有机酸和氨基酸,而高污染浓度下则产生抑制作用^[21]。玉米根系氨基酸分泌总量随着砒污染的加强显著增多,低质量分数($75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)砒处理和高质量分数($600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)砒处理下氨基酸分泌总量分别是无砒污染处理下的 1.25 倍和 5.12 倍,且不同砒质量分数处理下玉米根系分泌的氨基酸的种类和数量的变化情况不相同^[21]。本试验设计中,2 种基因型菜心根系分泌物对土壤中 DEHP 的解吸效应均随着培养液中 DEHP 浓度的增加而增大,即上清液中 DEHP 的浓度大小顺序均为 $T_2 > T_1 > T_0$,这可能与 DEHP 不同浓度污染下两种基因型菜心根系分泌物在数量和组成发生了变化有关,具体机理有待进一步研究。

同时,溶液培养第 15 d 两种基因型菜心根系分泌物对土壤中 DEHP 的解吸效应大于第 30 d,即菜心生长前期根系分泌物对土壤中 DEHP 的解吸效应大于生长后期,这可能与菜心不同生长阶段根系分泌物的组成和含量特征有关。

根系分泌物对土壤中 DEHP 的解吸效应大小与两者根系、茎叶中 DEHP 的含量高低趋势一致,相关性分析结果表明,根系和茎叶中 DEHP 的含量与菜心前期根系分泌物对土壤中 DEHP 解吸效应的相关系数(r)分别为 0.963 8 和 0.943 6,达极显著相关水平($P < 0.01$);与菜心后期根系分泌物对土壤中 DEHP 解吸效应的相关系数(r)分别为 0.924 9 和 0.944 5,达极显著相关水平。这说明两种基因型菜心根系分泌物对土壤中 DEHP 解吸效应大小可能是导致其根系、茎叶中 DEHP 含量高低差异的重要原因之一,解吸作用越强,根系吸收 DEHP 就越多。

4 结论

两种基因型菜心根系分泌物均能显著提高土壤中 DEHP 的解吸效应,油青 60 天菜心根系分泌物的解吸效应大于特青 60 天菜心(1.6~4.6 倍),且较高污染条件下根系分泌物对土壤中 DEHP 具有更强的解吸效应。

两种基因型菜心根系和茎叶中 DEHP 的含量与菜心前期根系分泌物对土壤中 DEHP 解吸效应的相关系数(r)分别为 0.963 8 和 0.943 6,与菜心后期根系

分泌物对土壤中DEHP解吸效应的相关系数(r)分别为0.924 9和0.944 5,达极显著水平。说明两种基因型菜心根系分泌物对土壤中DEHP解吸效应大小可能是导致其根系、茎叶中DEHP含量高低差异的重要原因之一,解吸作用越强,根系吸收DEHP就越多。

参考文献:

- [1] 秦 华,林先贵,陈瑞蕊,等. DEHP对土壤脱氢酶活性及微生物功能多样性的影响[J]. 土壤学报, 2005, 42(5):829-834.
QIN Hua, LIN Xian-gui, CHEN Rui-rui, et al. Effects of DEHP on dehydrogenase activity and microbial functional diversity in soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(5):829-834.
- [2] 谢慧君,石义静,腾少香,等. 邻苯二甲酸酯对土壤微生物群落多样性的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(5):1286-1291.
XIE Hui-jun, SHI Yi-jing, TENG Shao-xiang, et al. Impact of phthalic acid esters on diversity of microbial community in soil[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(5):1286-1291.
- [3] Yin R, Lin X G, Wang S G, et al. Effect of DnBP/DEHP in vegetable planted soil on the quality of capsicum fruit[J]. *Chemosphere*, 2003, 50: 801-805.
- [4] Cai Q Y, Mo C H, Wu Q T, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons and phthalic acid esters in the soil-radish (*Raphanus sativus*) system with sewage sludge and compost application[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99:1830-1836.
- [5] 曾巧云,莫测辉,蔡全英,等. 不同基因型菜心-土壤系统中邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯的分布特研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(6), 2239-2244.
ZENG Qiao-yun, MO Ce-hui, CAI Quan-ying, et al. Accumulation features of di-(2-ethylhexyl) phthalate in various genotypes of *Brassica parachinensis*-soil systems[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(6), 2239-2244.
- [6] 蔡全英,莫测辉,曾巧云,等. 邻苯二甲酸酯在不同品种通菜-土壤系统中的累积效应研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(8):1455-1458.
CAI Quan-ying, MO Ce-hui, ZENG Qiao-yun, et al. Accumulation of di-(2-ethylhexyl)phthalate in various genotype *Ipomoea aquatica*-paddy soil system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(8): 1455-1458.
- [7] Kapoor R. Root exudation and its application on rhizosphere mycoflora[J]. *Advances in Microbial Biotechnology*, 1999: 351-362.
- [8] Burken J G, Schnoor J L. Phytoremediation, plant uptake of atrazine and role of root exudates[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1996, 122 (11):958-963.
- [9] Aprill W, Sims R C. Evaluation of the use prairie grasses for stimulating PAH treatment in soil[J]. *Chemosphere*, 1990, 20:253-265.
- [10] Schnoor J L, Licht L A, McCutche S C, et al. Phytore mediation of organic and nutrient contaminants[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2003, 15(3):302-310.
- [11] 何海斌,何华勤,林文雄,等. 不同化感水稻品种根系分泌物中萜类化合物的差异分析[J]. 应用生态学报, 2005, 16(4):732-736.
HE Hai-bin, HE Hua-qin, LIN Wen-xiong, et al. Terpenoids in root exudates of different allelopathic rice varieties[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(4):732-736.
- [12] 王大娟,贾晓珊,陈 娟. 多氯代有机污染物胁迫下植物某些根系分泌物的变化[J]. 中山大学学报, 2007, 46(1):110-114.
WAN Da-juan, JIA Xiao-shan, CHEN Xian. Effects of PCOPs on some root exudates of plants[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2007, 46(1):110-114.
- [13] 许 超,夏北成. 茚对玉米根系分泌氨基酸的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(1):172-175.
XU Chao, XIA Bei-cheng. Effect of pyrene on amino acid in root exudates of maize (*Zea mays* L.)[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(1):172-175.
- [14] 龙新宪,刘洪彦,戴 军,等. 两种生态型东南景天根际与非根际土壤微生物特征的差异性[J]. 土壤学报, 2009, 46(3):547-552.
LONG Xin-xian, LIU Hong-yan, DAI Jun, et al. Difference between two ecotypes of *Sedum alfredii* hance in microbial characteristics of the rhizospheric and non-rhizospheric soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(3):547-552.
- [15] 文荣联. DEHP高/低吸收累积基因型菜心根际特征初步研究[D]. 广州:华南农业大学, 2007:10.
WEN Rong-lian. The roots morphologic and rhizosphere characteristics of different genotype *Brassica parachinensis* in uptake and accumulate phthalic acid esters[D]. Guangzhou:South China Agricultural University, 2007:10.
- [16] 蔡全英. 南方土壤-蔬菜系统有机污染生态学研究[D]. 广州:华南农业大学, 2003:8.
CAI Quan-ying. Research on pollution ecology of organic contaminants in soil-vegetable system, South China[D]. Guangzhou:South China Agricultural University, 2003:8.
- [17] Newman L A, Strand S E, Choe N, et al. Uptake and biotransformation of trichloroethylene byhybrid poplars[J]. *Environmental Science Technology*, 1997, 31:1062-1067.
- [18] Luthy R G, Bruseau M L. Sequestration of hydrophobic organic contaminants by geosorbents[J]. *Environmental Science Technology*, 1997, 31:3341-3347.
- [19] Simonich S L, Hites R A. Organic pollutant accumulation in vegetation[J]. *Environmental Science Technology*, 1995, 29:2905-2914.
- [20] Luo L, Zhang S Z, Shan X Q, et al. Oxalate and root exudates enhance the desorption of p, p'- DDT from soils[J]. *Chemosphere*, 2006, 63:1273-1279.