

2 种基因型菜心根系解剖结构差异及其对 DEHP 吸收累积的影响

曾巧云^{1,3}, 莫测辉^{2*}, 文荣联^{1,3}, 蔡全英^{1,3}

(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:在前期筛选出油青 60 d 菜心和特青 60 d 菜心分别为 PAEs 高/低吸收累积基因型菜心的基础上, 对其进行邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯 (DEHP) 不同污染水平 (20 mg·L⁻¹、50 mg·L⁻¹) 的溶液培养试验, 对比研究 2 种基因型菜心根系解剖结构的差异性, 初步探讨其与菜心吸收累积 DEHP 的关系。结果表明, 油青 60 d 菜心和特青 60 d 菜心的根系解剖结构及其对 DEHP 污染处理下的响应均存在显著差异。油青 60 d 菜心根系和茎叶中 DEHP 含量均主要受主根形成层外围厚度和须根中柱直径控制, 决定系数分别为 0.900 和 0.809。特青 60 d 菜心根系中 DEHP 含量主要受主根形成层外围厚度和须根皮层厚度控制, 决定系数为 0.757; 茎叶中 DEHP 含量主要受主根形成层外围厚度控制, 决定系数为 0.856。油青 60 d 菜心根系木射线细胞形状以排列规则的长方形为主, 主根木栓层厚度和须根皮层厚度较小, 须根中柱直径、导管数和导管直径较大, 表明油青 60 d 菜心根系比特青 60 d 菜心更有利于对 DEHP 的吸收累积。

关键词:菜心; 根系吸收; 根系解剖结构; DEHP 污染; 生物累积

中图分类号: X173 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)08-1981-06

Difference of Root Anatomy Characteristics and Its Effect on DEHP Accumulation in Two Genotypes of *Brassica parachinensis*

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

(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, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Two genotypes of *Brassica parachinensis*, DEHP high-accumulation of Youqing-60 and low-accumulation of Teqing-60, were grown in hydroponic systems contaminated with DEHP (20 and 50 mg·L⁻¹). Anatomy of roots was measured, and their effects on uptake of DEHP in roots and shoots were discussed. The results showed that roots anatomy of two genotypes of *Brassica parachinensis* and their responds to DEHP pollution were significantly different. DEHP contents in roots and shoots of Youqing-60 were mainly affected by the thickness of cambium in taproot and the diameter of vascular bundle, the coefficients on DEHP of roots and shoots were 0.900 and 0.809, respectively. DEHP contents of Teqing-60 were mainly affected by the thickness of cambium in taproot and cortex in fibre root in roots, which the coefficient was 0.757, and were mainly affected by the thickness of cambium in taproot in shoots, which the coefficient was 0.856. The wood ray cells in roots of Youqing-60 were rectangular shape and arranged orderly. The thickness of cork layer in taproot and cortex in fibre root of Youqing-60 were lower and the quantity of trachea and diameter of vascular bundle and trachea in fibre root of Youqing-60 were higher than that of Teqing-60, which indicated that DEHP in soil solution and adsorbed on root were easier penetrated into xylem and transported in Youqing-60 than in Teqing-60.

Key words: *Brassica parachinensis*; root absorption; root anatomy; DEHP pollution; bioaccumulation

吸收或吸附在植物根系表皮的有机污染物 (如多环芳烃 PAHs) 只有穿过根系表皮、皮层和中柱进入木质部后才能进一步运移至地上茎叶部^[1,2]。同时, 污染物在植物体内的吸收运移依赖于植物对水分的吸收运移, 受水分吸收运移作用强度的影响^[3]。因此, 植物根系解剖结构和水分的吸收运移与其吸收累积污染物质关系密切^[4-6]。逆境胁迫下植物往往会通过改变其根系解剖结构来适应不利的生长环境, 如调节根系木栓层厚度, 产生单宁物质与

污染物结合来减缓污染胁迫等^[6-8], 且不同植物类型或同一植物种类不同基因型的调节能力存在差异^[4,8,9]。目前对于有机污染条件下不同植物根系解剖结构的差异性及其与污染物吸收累积关系的研究

收稿日期: 2009-12-14; 修订日期: 2010-04-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30600372, 30471007); 东莞市科技计划项目 (2006101101053)

作者简介: 曾巧云 (1974 ~), 女, 硕士, 主要研究方向为环境有机污染与控制, E-mail: qiaoyunzeng@126.com

* 通讯联系人, E-mail: tchmo@jnu.edu.cn

还鲜见报道. 邻苯二甲酸酯 (PAEs) 是世界各国优先控制的有机污染物. 我国一些地区农业土壤中 PAEs 含量达到 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 甚至十几 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 超过了美国土壤控制标准^[10-14]. 农业土壤中 PAEs 污染可导致土壤酶活性和微生物群落功能多样性的下降^[15-17], 对植物生长和品质产生不利影响^[18], 且在植物体内累积而危害农产品安全^[18-20]. 植物对土壤中 PAEs 的吸收累积不仅种间存在差异, 而且存在种内差异^[19-21], 但关于吸收累积机制的研究较少报道^[22, 23]. 本实验在前期筛选出油青 60 d 菜心和特青 60 d 菜心分别为 PAEs 高/低吸收累积基因型菜心的基础上^[20], 进行邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯 (DEHP) 不同污染水平的溶液培养试验, 对比研究 DEHP 不同污染水平下 2 种基因型菜心根系解剖结构的差异性, 初步探讨根系解剖结构与 DEHP 吸收累积的关系.

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, 以油青 60 d 菜心 (DEHP 高吸收累积基因型菜心) 和特青 60 d 菜心 (DEHP 低吸收累积基因型菜心) 为供试植物 (种子购自广东省农业科学院). 营养液中 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. 在笔者的前期研究基础上, 营养液中 DEHP (分析纯, 天津试剂二厂) 设置 2 个污染水平 ($20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和对照处理 (未添加 DEHP), 各处理 4 个重复, 随机排列. 营养液的基本组成见文献^[24].

选择饱满一致的菜心种子, 播种于装有经 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 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% 浓度的营养液培养, 1 星期后营养液浓度由 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% 营养液中, 每盆移植 4 株幼苗. 每盆营养液的体积为 6.0 L, 营养液每天定期搅拌通气以保证植株供氧量. 每天用 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl 或 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH 调节各处理营养液的 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进行称重, 先后用自来水和去离子水洗净后备测.

1.2 根系解剖和测定方法

根系解剖方法采用石蜡制片法制作永久封片, 然后在光学显微镜下观察并摄影, 具体方法参考文

献^[25].

1.3 样品预处理与 GC/MS 测定条件

植物样品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^[20]. DEHP 检测方法采用 GC/MS 分析, 参考 US EPA 8270C 方法. 定量分析用 DEHP、内标化合物 (菲- d_{10} 、苊- d_{10}) 和代用品标准物质 (苯胺- d_5) 均为色谱纯标准物, 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.

1.4 数据处理

对数据采用多重比较 (Duncan)、相关分析和逐步回归分析, 所用软件为 SAS 8.1.

2 结果与分析

2.1 DEHP 不同污染水平下 2 种基因型菜心根系干重特征

随着培养液中 DEHP 污染浓度的增加, 油青 60 d 菜心根系干重有不同程度的增加, 其中 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理下根系干重达最大值; 特青 60 d 菜心在 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理下根系干重略有增加, 而 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理下根系干重则下降, 所有处理间差异均不显著 (表 1). 说明本实验中培养液中 DEHP 浓度为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 对 2 种基因型菜心根系生长均有一定的促进作用, 其中对油青 60 d 菜心 (与对照相比高 7.89%) 的促进作用大于特青 60 d 菜心 (与对照相比高 2.13%); 当培养液中 DEHP 浓度为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 对油青 60 d 菜心根系生长的促进作用减弱, 而对特青 60 d 菜心根系的生长则有轻微的抑制作用.

表 1 2 种基因型菜心根系干重¹⁾ / $\text{g} \cdot \text{盆}^{-1}$

Table 1 Dry weight of two genotypes of *Brassica parachinensis* / $\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$

| 菜心品种 | 对照 | $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ |
|---------|---------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 油青 60 d | $1.52 \pm 0.09 \text{ a}$ | $1.65 \pm 0.16 \text{ a}$ | $1.60 \pm 0.16 \text{ a}$ |
| 特青 60 d | $1.41 \pm 0.17 \text{ a}$ | $1.44 \pm 0.08 \text{ a}$ | $1.30 \pm 0.11 \text{ a}$ |

1) 表中数据为平均值 \pm 标准误 ($n = 4$); 含相同字母者表示差异不显著 ($p = 0.05$), 下同

2.2 DEHP 不同污染水平下 2 种基因型菜心主根解剖结构特征

不同污染水平下 2 种基因型菜心主根解剖结构参数见表 2. 由于水培时间较长, 根系表皮层细胞不完整或者脱落, 木栓层明显, 韧皮部周围的薄壁细胞

表 2 2 种基因型菜心主根解剖结构特征对比¹⁾

Table 2 Difference of root anatomy in taproot of two genotypes of *Brassica parachinensis*

| 菜心品种 | 处理 | 木栓层厚度/ μm | 导管数/个 | 导管直径/ μm | 形成层外围厚度/ μm |
|---------|-----------------------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 油青 60 d | 对照 | $35.36 \pm 1.18 \text{ b}$ | $39 \pm 2 \text{ c}$ | $23.75 \pm 2.12 \text{ b}$ | $216.60 \pm 4.76 \text{ e}$ |
| | $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | $37.41 \pm 1.25 \text{ ab}$ | $46 \pm 1 \text{ c}$ | $18.81 \pm 1.34 \text{ b}$ | $207.72 \pm 4.07 \text{ e}$ |
| | $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | $24.74 \pm 2.20 \text{ c}$ | $43 \pm 2 \text{ c}$ | $29.83 \pm 2.20 \text{ a}$ | $259.30 \pm 2.66 \text{ d}$ |
| 特青 60 d | 对照 | $38.61 \pm 1.98 \text{ ab}$ | $57 \pm 3 \text{ b}$ | $21.58 \pm 1.35 \text{ b}$ | $430.83 \pm 8.89 \text{ a}$ |
| | $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | $40.96 \pm 1.62 \text{ a}$ | $58 \pm 2 \text{ b}$ | $22.47 \pm 1.06 \text{ b}$ | $393.55 \pm 4.03 \text{ b}$ |
| | $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | $27.06 \pm 1.59 \text{ c}$ | $71 \pm 4 \text{ a}$ | $23.90 \pm 1.97 \text{ b}$ | $305.51 \pm 7.55 \text{ c}$ |

1) 木栓层厚度、导管直径在 $\times 10$ 下测量,形成层外围厚度在 $\times 4$ 下测量

都含有丰富的内含物,维管形成层明显,木质部后生导管发达,孔径大,纤维丰富。在后生木质部中,木射线细胞一般为 3~4 列,射线很明显。油青 60 d 菜心木射线细胞形状以长方形为主,而特青 60 d 菜心木射线细胞形状多不规则。

木栓层具有高度不透水性,并有抗压、抗有机溶剂等特性,对植物体起保护作用^[25]。在 DEHP 各污染水平下油青 60 d 菜心主根木栓层厚度均低于特青 60 d 菜心,但差异不显著。在 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理下 2 种基因型菜心主根木栓层厚度均略有增加,但在 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理下则均显著降低。可能是在低污染水平下菜心通过木栓层栓质化来自我保护以避免毒害,而在高污染水平下根系受到毒害作用,抑制了木栓层发育。

导管是植物吸收运输水分、养分等物质的主要通道^[25]。在 DEHP 各污染水平下油青 60 d 菜心主根导管数均显著低于特青 60 d 菜心,但导管直径在 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理下显著高于特青 60 d 菜心。随着 DEHP 污染浓度的增加,2 种基因型菜心的导管数和导管直径均呈增加趋势,其中在 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理下

油青 60 d 菜心主根导管直径显著增加,而特青 60 d 菜心菜心则主根导管数显著增加。

主根形成层外围包括木栓层、皮层薄壁细胞和韧皮部,是光合产物运输和物质贮藏的重要部位^[25]。在 DEHP 各污染水平下油青 60 d 菜心主根形成层外围厚度均显著低于特青 60 d 菜心。随着 DEHP 污染浓度的增加,油青 60 d 菜心主根形成层外围厚度显著增加,而特青 60 d 菜心主根形成层外围厚度则显著降低。

2.3 DEHP 不同污染水平下 2 种基因型菜心须根解剖结构特征

2 个菜心品种的须根结构基本相似,初生构造均由表皮、皮层和维管柱组成。初生木质部为二原型,与初生韧皮部相间排列在同一圆周上,无髓,皮层薄壁细胞基本上有 5 层,形状不规则。除了 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理下油青 60 d 菜心表皮整齐,中柱明显,皮层薄壁细胞和细胞之间有明显的单宁物质外,其它的处理表皮粗糙,中柱不明显,也不含单宁物质。DEHP 不同污染水平下 2 种基因型菜心须根解剖结构参数见表 3。

表 3 2 种基因型菜心须根解剖结构特征对比

Table 3 Difference of root anatomy in fibre root of two genotypes of *Brassica parachinensis*

| 菜心品种 | 污染水平 | 皮层厚度/ μm | 中柱直径/ μm | 导管数/个 | 导管直径/ μm |
|---------|-----------------------------------|-----------------------------|----------------------------|-------|----------------------------|
| 油青 60 d | 对照 | $65.31 \pm 1.65 \text{ e}$ | $55.84 \pm 0.71 \text{ c}$ | 3~4 | $29.74 \pm 1.18 \text{ b}$ |
| | $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | $112.41 \pm 2.49 \text{ a}$ | $91.54 \pm 4.13 \text{ a}$ | 4~6 | $28.09 \pm 1.69 \text{ b}$ |
| | $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | $73.37 \pm 2.24 \text{ d}$ | $94.51 \pm 2.55 \text{ a}$ | 8~9 | $47.98 \pm 2.37 \text{ a}$ |
| 特青 60 d | 对照 | $100.18 \pm 2.09 \text{ b}$ | $78.51 \pm 2.16 \text{ b}$ | 5~6 | $23.62 \pm 1.67 \text{ b}$ |
| | $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | $107.59 \pm 1.81 \text{ a}$ | $79.40 \pm 1.71 \text{ b}$ | 3~4 | $27.49 \pm 1.93 \text{ b}$ |
| | $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | $94.11 \pm 1.46 \text{ c}$ | $83.43 \pm 1.93 \text{ b}$ | 5~6 | $27.86 \pm 1.32 \text{ b}$ |

皮层位于表皮和维管柱之间,由多层薄壁细胞组成,在幼根中占有相当大的比例,具有贮藏营养物质的功能^[25]。油青 60 d 菜心须根皮层厚度在对照处理和 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理下均显著低于特青 60 d 菜心。在 DEHP 污染下油青 60 d 菜心须根皮层厚度显

著增加,尤其是在 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理下增加更大。特青 60 d 菜心须根皮层厚度在低污染水平下显著增加,而在高污染水平下显著降低。

中柱也称维管束,包括中柱鞘、初生木质部、初生韧皮部和薄壁组织等 4 部分^[25]。在对照处理下油

青 60 d 菜心须根中柱直径显著小于特青 60 d 菜心。但在 DEHP 污染处理下,油青 60 d 菜心中柱直径显著增加,而特青 60 d 菜心中柱直径仅略有增加,从而造成在 DEHP 污染处理下油青 60 d 菜心中柱直径显著大于特青 60 d 菜心。

在对照处理和 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理下 2 种基因型菜心须根导管数和直径大体相当,但在 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理下油青 60 d 菜心须根导管数和导管直径均显著增加,且显著大于特青 60 d 菜心。

2.4 根系解剖结构参数与菜心根系和茎叶中 DEHP 含量的关系

相关分析结果表明(表 4),主根木栓层厚度与 2 种基因型菜心根系和茎叶中 DEHP 含量均呈显著负相关性,而主根导管数和导管直径以及须根

中柱直径和导管直径均与 2 种基因型菜心根系和茎叶中 DEHP 含量均呈显著正相关性。主根形成层外围厚度和须根皮层厚度与油青 60 d 菜心根系和茎叶中 DEHP 含量呈显著正相关性,与特青 60 d 菜心根系和茎叶中 DEHP 含量呈显著负相关性。根系结构参数与根系、茎叶中 DEHP 含量之间的这些相关性既反映了 2 种基因型菜心根系、茎叶中 DEHP 含量与根系结构参数之间的关系,也反映了 2 种基因型菜心在 DEHP 污染胁迫下根系结构参数发生变化的响应情况。对比表 2~4 可以看出,主根木栓层厚度、形成层外围厚度和须根皮层厚度越小,以及主根导管数、导管直径和须根中柱直径、导管直径越大,就越有利于菜心对 DEHP 的吸收累积。

表 4 菜心根系解剖结构与其根系和茎叶中 DEHP 含量的相关性分析¹⁾

Table 4 Correlation between root anatomy and DEHP contents in root and shoot of two genotypes of *Brassica parachinensis*

| 根系 | 指标类型 | 油青 60 d 菜心 | | 特青 60 d 菜心 | |
|----|---------|------------|------------|------------|------------|
| | | 根系 DEHP 含量 | 茎叶 DEHP 含量 | 根系 DEHP 含量 | 茎叶 DEHP 含量 |
| 主根 | 木栓层厚度 | -0.618* | -0.706* | -0.578* | -0.680* |
| | 导管数量 | 0.438 | 0.343 | 0.674* | 0.752** |
| | 导管直径 | 0.393 | 0.509 | 0.334 | 0.355 |
| | 形成层外围厚度 | 0.609* | 0.707* | -0.870** | -0.925** |
| 主根 | 皮层厚度 | 0.318 | 0.177 | -0.298 | -0.430 |
| | 中柱直径 | 0.949** | 0.899** | 0.451 | 0.487 |
| | 导管直径 | 0.644* | 0.730** | 0.348 | 0.330 |

1) 样本量 $N=12$ $n=3$; * 表示 0.05 水平的差异显著, ** 表示 0.01 水平的差异显著

逐步回归分析结果表明(表 5),主根形成层外围厚度和须根中柱直径对油青 60 d 菜心根系和茎叶中 DEHP 含量的影响最大,分别决定了根系和茎叶中 DEHP 含量的 90.0% 和 80.9%;主根形成层外

围厚度和须根皮层厚度对特青 60 d 菜心根系中 DEHP 含量的影响最大,主根形成层外围厚度对特青 60 d 菜心茎叶中 DEHP 含量的影响最大,分别决定了根系和茎叶中 DEHP 含量的 75.7% 和 85.6%。

表 5 菜心根系解剖结构与其根系和茎叶中 DEHP 含量的逐步回归¹⁾

Table 5 Stepwise regression of DEHP contents in root and shoot against root anatomy of two genotypes of *Brassica parachinensis*

| 菜心品种 | 指标类型 | 入选变量 | 回归方程 | 标准化偏回归系数 | 决定系数 R^2 |
|---------|------|------------------|-------------------------------------|-----------------|------------|
| 油青 60 d | 根系 | 形成层外围厚度(X_4) | $Y = -40.704 + 0.105X_4 + 0.407X_6$ | $X(B1) = 0.073$ | 0.900* |
| | | 中柱直径(X_6) | | $X(B2) = 0.900$ | |
| | 茎叶 | 形成层外围厚度(X_4) | $Y = -13.127 + 0.040X_4 + 0.092X_6$ | $X(B1) = 0.158$ | 0.809* |
| | | 中柱直径(X_6) | | $X(B2) = 0.809$ | |
| 特青 60 d | 根系 | 形成层外围厚度(X_4) | $Y = 19.203 - 0.123X_4 + 0.370X_5$ | $X(B1) = 0.757$ | 0.757* |
| | | 皮层厚度(X_5) | | $X(B2) = 0.100$ | |
| | 茎叶 | 形成层外围厚度(X_4) | $Y = 8.234 - 0.018X_4$ | $X(B1) = 0.856$ | 0.856* |

1) * 表示 0.01 水平的差异显著

3 讨论

植物根系形态解剖结构因植物种类和环境条件的不同而异^[4,8,9]。本研究中 2 种 DEHP 高/低吸收

累积基因型菜心的根系形态解剖结构存在显著差异性,且这种差异与 DEHP 污染浓度相关。如油青 60 d 菜心主根木栓层厚度和须根导管直径在对照处理和污染水平下均大于特青 60 d 菜心,而须根中柱直径

和导管数在对照处理下小于特青 60 d 菜心,但在 DEHP 污染处理下则相反。

植物在污染胁迫下往往会通过改变其根系形态结构来适应不利的生长环境^[8]。本研究中随着 DEHP 污染浓度的增加 2 种基因型菜心主根的导管数量和直径以及须根的中柱直径和导管直径均增加,其适应机制尚有待进一步研究。2 种基因型菜心根系解剖结构对 DEHP 污染胁迫的调节能力存在显著差异,如油青 60 d 菜心主根导管数在 DEHP 污染水平下略有增加,而特青 60 d 菜心则显著增加;油青 60 d 菜心须根皮层厚度在 DEHP 2 个污染水平下均显著增加,而特青 60 d 菜心须根皮层厚度仅在 DEHP 低污染水平 ($20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 下显著增加,但在高污染水平 ($50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 下则显著降低。 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理下油青 60 d 菜心皮层薄壁细胞和细胞之间有明显的单宁物质,减缓 DEHP 对植株的毒害效应,这可能也是油青 60 d 菜心对 DEHP 耐受性相对较强的原因之一。

吸收或吸附在植物根系表皮的有机污染物(如多环芳烃 PAHs)只有穿过根系表皮、皮层和中柱进入木质部后才能进一步运移至地上茎叶部^[1,2]。污染物在植物体内的吸收运移依赖于植物对水分的吸收运移,受水分吸收运移作用强度的影响^[3]。一般来说,根系木栓层和皮层厚度愈大,水分和污染物就愈难渗透;根系导管数愈多和导管直径愈大,就越有利于对水分和污染物的吸收运移;根系中柱愈大,特别是中柱的初生木质部和初生韧皮部有利于对水分和污染物的吸收运移。油青 60 d 菜心根系木射线细胞形状以排列规则的长方形为主,主根木栓层厚度和须根皮层厚度相对较小,须根中柱直径、导管数和导管直径相对较大。所有这些根系结构参数都表明油青 60 d 菜心比特青 60 d 菜心更有利于对水分和 DEHP 的吸收运移,导致油青 60 d 菜心成为 PAEs 高吸收累积基因型,而特青 60 d 菜心属于 PAEs 低吸收累积基因型。这一认识也受到 2 种基因型菜心根系的其它生理生化特征如根脂含量、根系分泌物对土壤中 DEHP 解吸效应等证据的支持^[26]。

4 结论

(1)油青 60 d 菜心根系和茎叶中 DEHP 含量均主要受主根形成层外围厚度和须根中柱直径控制,其对根系和茎叶中 DEHP 含量的决定系数分别为 0.900 和 0.809。特青 60 d 菜心根系中 DEHP 含量主要受主根形成层外围厚度和须根皮层厚度控制,

决定系数为 0.757;茎叶中 DEHP 含量主要受主根形成层外围厚度控制,决定系数为 0.856。

(2)油青 60 d 菜心根系木射线细胞形状以排列规则的长方形为主,主根木栓层厚度和须根皮层厚度较小,须根中柱直径、导管数和导管直径较大,表明油青 60 d 菜心根系对 DEHP 的吸收累积比特青 60 d 菜心更强。

参考文献:

- [1] Paterson S, Machay D, Tam D, et al. Up take of organic chemical by plants: a review of processes, correlation sand models [J]. Chemosphere, 1990, **21**:297-331.
- [2] Collins C, Fryer M, Grosso A. Plant uptake of non-ionic organic chemicals [J]. Environ Sci Technol, 2006, **40**:45-52.
- [3] Hardiman R T, Jacoby B. Absorption and translocation of Cd in bush beans (*Phaseolous vulgaris*) [J]. Physiol Plant, 1984, **61**:470-474.
- [4] 王周锋,张岁岐,刘小芳. 玉米根系水流导度差异及其与解剖结构的关系 [J]. 应用生态学报, 2005, **16**(12):2349-2352.
- [5] 杨晓青,张岁岐,刘小芳,等. 不同抗旱型冬小麦品种根系水力导度与解剖结构的关系 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, **35**(8):160-164.
- [6] 司江英,陈冬梅,封克. 介质 pH 和氮形态对玉米苗期根系导管发育的影响 [J]. 安徽农业科学, 2007, **35**(6):1587-1588.
- [7] 覃光球,严重玲,韦莉莉. 秋茄幼苗叶片单宁、可溶性糖和脯氨酸含量对 Cd 胁迫的响应 [J]. 生态学报, 2006, **26**(10):3366-3371.
- [8] 封克,司江英,汪晓丽,等. 不同水分条件下水稻根解剖结构的比较分析 [J]. 植物营养与肥料学报, 2006, **12**(3):346-351.
- [9] 马艳芝,田立民. 海芋水培与土培根解剖结构比较研究 [J]. 安徽农业科学, 2009, **37**(3):1075-1076.
- [10] 蔡全英,莫测辉,李云辉,等. 邻苯二甲酸酯 (PAEs) 在广州和深圳地区蔬菜生产基地土壤的污染特征 [J]. 生态学报, 2005, **25**(2):283-288.
- [11] 关卉,王金生,万洪富,等. 雷州半岛典型区域土壤邻苯二甲酸酯 (PAEs) 污染研究 [J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(2):622-628.
- [12] 杨国义,张天彬,高淑涛,等. 广东省典型区域农业土壤中邻苯二甲酸酯的分布特征 [J]. 应用生态学报, 2007, **18**(10):2308-2312.
- [13] Xu G, Li F S, Wang Q H. Occurrence and degradation characteristics of dibutyl phthalate (DBP) and di-(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) in typical agriculral soils of China [J]. Sci Total Environ, 2008, **393**:333-340.
- [14] Zeng F, Cui K Y, Xie Z Y, et al. Phthalate esters (PAEs): Emerging organic contaminants in agricultural soils in pere-urban areas around Guangzhou, China [J]. Environ Pollut, 2008, **156**:425-434.
- [15] 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.

- [16] 高军, 陈伯清. 酞酸酯污染土壤微生物效应与过氧化氢酶活性的变化特征[J]. 水土保持学报, 2008, **22**(6):166-169.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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]. Bioresour Technol, 2008, **99**:1830-1836.
- [22] 曾巧云, 莫测辉, 蔡全英, 等. 菜心对邻苯二甲酸酯(PAEs)吸收累积特征及途径的初步研究[J]. 农业工程学报, 2005, **21**(8):137-141.
- [23] 曾巧云, 莫测辉, 蔡全英, 等. 萝卜对邻苯二甲酸酯(PAEs)吸收累积特征及途径的初步研究[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(1):11-16.
- [24] 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.
- [25] 李正理. 植物制片技术学(上册)[M]. 北京: 人民教育出版社, 1984. 136-160.
- [26] 曾巧云, 莫测辉, 蔡全英, 等. 两种基因型菜心根系形态和生理特性差异对其吸收累积 DEHP 影响的初步研究[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(6):1280-1285.