

DEHP 胁迫对高/低累积邻苯二甲酸酯品种水稻抗氧化酶系统的影响

陈意良, 鲁磊安, 莫测辉, 蔡全英*

暨南大学环境学院 广东省高校水土环境毒害性污染物防治与生物修复重点实验室 广东广州 510632

摘要 以前期筛选获得的邻苯二甲酸酯(PAEs)高/低累积基因型水稻(*Oryza sativa* L.)品种(培杂泰丰/丰优丝苗)进行土培试验, 对比研究邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(DEHP)污染胁迫下 2 个品种水稻体内过氧化物酶(POD)和多酚氧化酶(PPO)活性及丙二醛(MDA)含量变化, 以揭示 DEHP 胁迫下 2 个品种的生理生化和 DEHP 累积差异。结果显示, 2 个品种水稻体内 DEHP 含量随土壤污染浓度增加而增加, 但生物量下降, 而且培杂泰丰地上部的生物量敏感性响应指数和 DEHP 含量比丰优丝苗的高, 说明前者对 DEHP 的耐受性更强。2 个品种水稻体内丙二醛含量基本保持不变, 但过氧化物酶和多酚氧化酶活性则随土壤 DEHP 浓度的增加而升高, 说明水稻可能通过提高过氧化物酶和多酚氧化酶活性以降低 DEHP 胁迫。丰优丝苗的多酚氧化酶活性较培杂泰丰的高, 可能影响到 DEHP 在水稻体内降解进而导致前者体内 DEHP 含量较低。

关键词 邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯; 水稻; 多酚氧化酶; 过氧化物酶; 丙二醛

中图分类号 S511; X173

文献标识码 A

Effects of DEHP Stress on Antioxidant Enzyme System of Rice (*Oryza sativa* L.) Cultivars with High- and Low-PAE Accumulation

CHEN Yiliang, LU Leian, MO Cehui, CAI Quanying*

School of Environment, Jinan University / Key Laboratory of Water/Soil Toxic Pollutants Control and Bioremediation of Guangdong Higher Education Institutions, Guangzhou, Guangdong 510632, China

Abstract Two different genotypic cultivars of rice (*Oryza sativa* L.) with PAE (phthalic acid esters) high-accumulation (cultivar Peizataifeng) and low-accumulation (cultivar Fengyousimiao) were grown in soil spiked with di (2-ethylhexyl) phthalate (DEHP, 0, 50, and 100 mg/kg). The peroxidase (POD) and polyphenol oxidase (PPO) activities, malondialdehyde (MDA) content were measured to reveal the difference in DEHP accumulation, physiology and biochemistry changes between Peizataifeng and Fengyousimiao. The results indicated that DEHP concentrations in rice plants increased while the biomass of rice decreased with increasing concentrations of DEHP in the soil. The index of biomass response to stress of Peizataifeng was higher than that of Fengyousimiao, indicating that Peizataifeng was more tolerant to DEHP than Fengyousimiao. The MDA contents of the two cultivars kept unchanged while the activities of PPO and POD increased with increasing concentrations of DEHP in the soil. These results illustrated that the rice might alleviate DEHP stress by elevating the activities of PPO and POD. The PPO activity of Fengyousimiao was higher than that of Peizataifeng, which might affect the *in-vivo* degradation of DEHP, and thus led to a lower DEHP concentration in Fengyousimiao than Peizataifeng.

Key words Di (2-ethylhexyl) phthalate; Rice; Peroxidase; Polyphenol oxidase; Malondialdehyde

doi 10.3969/j.issn.1000-2561.2016.08.007

随着农业生产中地膜覆盖和塑料大棚的广泛应用, 2014 年中国农用塑料薄膜使用量达 258 万 t (地膜使用量为 144 万 t)^[1], 约 20% 的地膜残留在土壤中^[2]。其中, 邻苯二甲酸酯(PAEs, 俗称塑化剂)在塑料中含量可达 40%~60%^[3], 地膜残留, 加上大量施用化肥农药及“三废”污染, 导致土壤

PAEs 含量上升。有研究发现, 全国农业土壤 PAEs 含量以广东最高, 部分高达几个到几十个 mg/kg^[4-5]。而且广东地区不同类型农业土壤中 PAEs 含量以水田的最高, 其中以邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(DEHP)检出最普遍且含量最高^[6]。PAEs 尤其是长链的 DEHP 属于典型的环境内分泌干扰物, DEHP

收稿日期 2016-02-22

修回日期 2016-06-30

基金项目 国家自然科学基金(No. 41273113)。

作者简介 陈意良(1990年—), 男, 硕士; 研究方向: 环境修复与应用技术。*通讯作者(Corresponding author): 蔡全英(CAI Quanying), E-mail: yingqy@126.com。

具有潜在“三致”毒性,被美国环保局(USEPA)列为“优控污染物”。

残留在土壤中的 DEHP 会通过根系吸收进入植物体内,影响植物生长及生理生化功能^[7-8]。作者前期研究结果表明,低浓度 DEHP 处理会促进大部分品种菜心生长(生物量增加),而高浓度处理则有明显的抑制作用^[8]。植物体内的生理生化过程是植物吸收累积外源污染物的内在调节因素^[9],特别是植物体内的酶系统对植物应对污染物胁迫的能力至关重要。其中,多酚氧化酶(PPO)被认为在植物体内可降解环状化合物^[10],是与植物体内防御系统有关的重要蛋白质^[11]。植物会提高体内 PPO 活性来应对受到的生物或者非生物性胁迫^[12-13]。有研究发现,PAEs 胁迫下植物体内会产生大量的活性氧自由基,可能会导致脂质过氧化和酶失活等^[14]。丙二醛作为细胞内膜脂过氧化或脱脂的产物,其含量的多少可以代表膜损伤程度的大小。过氧化物酶(POD)是一种重要的保护酶,能清除植物体内多余的活性氧自由基,抑制膜脂的过氧化进程^[15],从而保护植物生理活动的正常进行以应对外源污染物的胁迫。

外源污染胁迫下不同植物体内酶系统的反应不一样,进而影响到污染物对植物的毒理效应以及污染物在体内的降解,最终表现为不同植物对污染物的吸收累积差异^[8,16]。作者前期研究发现,不同品种水稻对 DEHP 的吸收累积存在差异^[16],其根系形态和根系分泌物等也存在品种差异^[17]。但 DEHP 胁迫下不同品种水稻的酶活性变化尚未清楚。本研究以前期筛选获得的高/低累积 PAEs 水稻品种培杂泰丰和丰优丝苗为供试植物^[17],研究 DEHP 污染胁迫下 2 种水稻体内的多酚氧化酶、过氧化物酶活性以及丙二醛含量的变化规律,为揭示其累积差异机理和保障农产品安全提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

DEHP(AR)购自阿拉丁(上海公司)。培杂泰丰种子购自华南农业大学,丰优丝苗种子购自广东省农业科学研究院。水稻土取自华南农业大学试验农场田间 0~20 cm 的耕作层,采集后于室内风干、粉碎过 5 mm 筛备用。水稻土 DEHP 背景值 0.71 mg/kg, pH5.59,有机质 30.2 g/kg, CEC 7.67 cmol/kg,全氮 1.26 g/kg、全磷 1.79 g/kg 和全钾 18.0 g/kg,粒径组成:砂粒 52.0%,粉粒 41.9%,粘粒 6.1%。

1.2 方法

1.2.1 盆栽试验方法 采用培杂泰丰(PAEs 高累

积)和丰优丝苗(PAEs 低累积)进行土壤培养试验。设置空白、低浓度、高浓度 3 个处理。采用人工配制污染土壤,即量取一定量的 DEHP 溶于丙酮(AR),添加到水稻土(过 1 mm 筛)中,混匀,放置暗处让丙酮自然挥发 3 d(中途不断搅拌使丙酮尽快挥发),制得 DEHP 含量为 500 mg/kg 和 1 000 mg/kg 的污染土壤。按污染土壤与未污染土壤 1:9 的比例进行搅拌混匀,制得盆栽污染土壤(DEHP 含量为 50 mg/kg(低浓度)和 100 mg/kg(高浓度))。以不添加 DEHP 的土壤为对照处理(CK)。每个处理 3 个重复,采用随机排列。

将丰优丝苗和培杂泰丰 2 个品种的种子分别用 15% 的过氧化氢消毒 10 min,然后将消毒过的种子转移到培养皿中,置于生化培养箱中催芽 24 h。将催芽后的种子撒在铺满基质的育苗板上,待水稻苗长至 4~5 片叶子时进行移苗。移苗后,每天浇水保持土壤呈淹水状态,并不定期添加营养液保证水稻正常生长。待长到 45 d 的时候,采集水稻根系和地上部样品。分别测定生物量、DEHP 含量、过氧化物酶活性、多酚氧化酶活性及丙二醛含量。

1.2.2 DEHP 含量测定 植物样品采用二氯甲烷(色谱纯)超声提取,方法参考 USEPA 3500b^[16]并适当修改。准确称量粉碎后的植物样品(地上部 1.0 g,地下部 0.5 g)于 50 mL 玻璃离心管中。加入 20 mL 二氯甲烷超声提取 10 min,3 300 r/min 离心分离(重复 3 次),将上述上清液合并后过硅胶柱净化,旋转蒸发仪(亚荣 RE-52A,上海)浓缩,氮吹仪吹干后定容,4 ℃ 保存待测。待测液中 DEHP 采用气相色谱-质谱仪联机(GC-MS)分析,参考 USEPA 8270C 方法^[17]并适当修改。GC-MS 联用仪型号为 GC-MSQP2010(岛津,日本),色谱柱为 Rxi-5MS 石英毛细管柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm),载气为高纯氦气(He)。质谱仪采用电子轰击源(EI)。采用 DEHP 化合物标样的 0.1、0.2、0.5、1.0、2.0、4.0 mg/L 为工作曲线。DEHP 回收率为 88.03%~100.3%。水稻体内 DEHP 含量以干重计。

1.2.3 植物酶活性的测定 采用分光光度法测定 PPO、POD 活性和 MDA 含量,具体的测定方法参照 Ma 等^[18]的方法。

1.3 统计分析方法

采用 Excel 进行数据整理及制图,SPSS 进行统计分析。

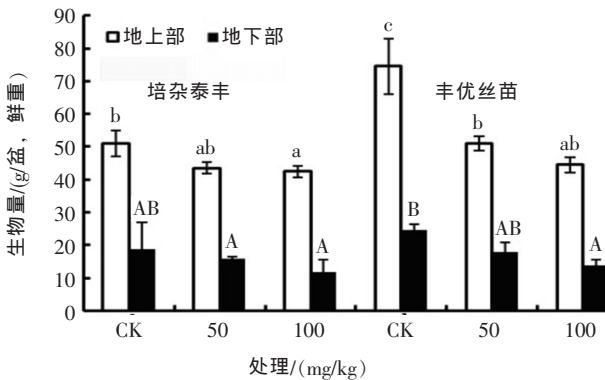
为了比较培杂泰丰和丰优丝苗对 PAEs 污染胁迫的反应,按照下列公式计算生物量敏感性响应指数(BRS)^[19]:

$BRS/\% = (B_H - B_L) / B_L \times 100$ $B_H(g)$ 、 $B_L(g)$ 分别是高浓度处理和低浓度处理的生物量。

2 结果与分析

2.1 DEHP 胁迫对水稻生物量的影响

由图 1 可以看出, 培杂泰丰和丰优丝苗的地上部和地下部的生物量均随着 DEHP 浓度的增大而减小, 说明 50 mg/kg DEHP 会抑制 2 种水稻的生长。而且, 培杂泰丰地上部的生物量敏感性响应指数比丰优丝苗大, 且差异显著($p < 0.05$)(表 1), 说明丰优丝苗对 DEHP 胁迫比培杂泰丰更为敏感。



柱上不同的大写或小写字母表示不同处理生物量之间差异显著($p < 0.05$)。

Different capital and lowercase letters indicate significant difference among different treatments($p < 0.05$).

图1 水稻生物量

Fig. 1 Biomass of the rice

表1 生物量敏感性响应指数

Table 1 Index of biomass response to stress

品种	地上部	地下部
培杂泰丰	-6.612 a	-24.630 a
丰优丝苗	-12.82 b	-22.927 a

说明: 同一列不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。

Note: Different letters in the same column indicate significant difference ($p < 0.05$).

2.2 水稻体中 DEHP 含量

随着 DEHP 浓度的升高, 培杂泰丰和丰优丝苗的地上部和地下部 DEHP 的含量均增加, 且不同处理水平之间差异极显著(表 2), 说明水稻体对 DEHP 有累积效应。但 2 个品种水稻地上部的 DEHP 含量比同等污染水平下(100 mg/kg)的菜心地上部 DEHP 含量显著低^[8], 说明水稻地上部较菜心累积 DEHP 少。同一处理地下部与地上部相比, 前者 DEHP 含量较高, 即 DEHP 在水稻体内的转运系数小于 1, 说明 DEHP 更易被根系累积或滞留。经双因素方差分析, 品种间地上部 DEHP 含量差异显著, 地下部无显著差异(表 2), 验证了培杂泰丰和丰优丝苗分别是高、低累积 DEHP 的水稻品种。

2.3 水稻体酶活性

2.3.1 过氧化物酶活性 过氧化物酶(POD)是植物抗氧化酶系统中的一种重要保护酶, 能清除机体内活性氧自由基, 有利于植物维持体内活性氧产生和淬灭的动态平衡, 从而抑制膜脂过氧化进程。如图 2 所示, 培杂泰丰和丰优丝苗地上部的 POD 活性均随着 DEHP 浓度的升高而升高。经双因素方差分析表明(表 3), 培杂泰丰和丰优丝苗 2 个品种的多酚氧化酶活性无显著差异, 但二者地上部的 DEHP 含量差异极显著, 这说明不同品种水稻对 DEHP 胁迫产生应激反应的阈值不同, 培杂泰丰比丰优丝苗更耐受 DEHP 胁迫。

2.3.2 多酚氧化酶活性 多酚氧化酶 (PPO)是一种存在于多种真菌和植物组织内、能够促进酚类化合物氧化的一类酶的通称^[20]。图 3 可知, 随着土壤 DEHP 浓度的升高, PPO 活性整体呈上升趋势, 与植物中 DEHP 含量变化规律一致(表 1)。说明高浓度 DEHP 处理会激活 PPO, 从而保护植物不受 DEHP 毒害。经双因素方差分析可知(表 3), 不同浓度、不同品种之间 PPO 活性差异极显著。

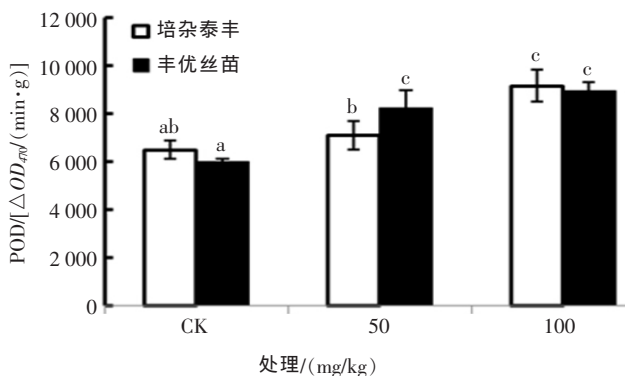
表2 水稻体中DEHP含量

Table 2 DEHP concentrations in the rice plant

指标	培杂泰丰			丰优丝苗		
	CK	50 mg/kg	100 mg/kg	CK	50 mg/kg	100 mg/kg
地上部	(0.20±0.04)cB	(0.67±0.04)bA	(1.29±0.21)aB	(0.28±0.07)cA	(0.54±0.13)bcA	(0.71±0.13)bB
地下部	(0.36±0.13)bA	(0.97±0.21)bA	(3.13±0.72)aA	(0.39±0.06)bA	(0.61±0.08)bA	(2.54±0.56)aA
F	品种	5.349*	3.766 ^{ns}			
	处理水平	24.396**	83.989**			

说明: 数据为平均值±标准差(n=3); 同一列含相同大写字母者差异不显著; 同一行含相同小写字母差异不显著($p > 0.05$); *表示 $p < 0.05$ 的显著性差异水平; **表示 $p < 0.01$; ns表示不显著。

Note: Data=Mean ± Standard error; the same capital letters in the same column indicate no significant difference; the same lowercase letters in the same row indicate no significant difference ($p > 0.05$); *and ** indicates significant difference at $p < 0.05$ and $p < 0.01$ level, respectively; ns indicates no significant difference.



图柱上不同的小写字母表示不同处理POD活性之间差异显著 ($p < 0.05$)。下同。

Different letters on the bar indicate significant difference among different treatments ($p < 0.05$). The same as below.

图2 不同处理对水稻过氧化物酶活性的影响
Fig. 2 Effects of different DEHP treatments on POD activities of rice

表3 水稻品种及DEHP处理水平对过氧化物酶、多酚氧化酶、MDA含量的双因素方差分析

Table 3 Double-factor variance analysis of rice cultivars and DEHP levels to polyphenol oxidase, peroxidase and MDA content

指标	过氧化物酶	多酚氧化酶	MDA含量
品种	0.304 ^{ns}	67.450 ^{**}	0.272 ^{ns}
F			
处理水平	28.758 ^{**}	8.527 ^{**}	1.069 ^{ns}

说明：**表示 $p < 0.01$ 水平的显著性差异水平；ns表示差异不显著 ($p > 0.05$)。

Note: ** indicates significant difference at $p < 0.01$ level, ns indicates non-significant difference ($p > 0.05$).

2.3.3 丙二醛含量 植物受到外源污染物入侵时，会产生大量的活性氧自由基，其易使植物细胞内膜发生过氧化作用或脱脂作用，丙二醛(MDA)作为细胞内膜脂过氧化或脱脂的产物，其含量的多少可以代表膜损伤程度的大小^[15]。由图 4 可以看到，低 DEHP 处理培杂泰丰的 MDA 含量显著高于其对照，浓度增加后 MDA 含量下降；而丰优丝苗各处理间 MDA 含量无显著差异。

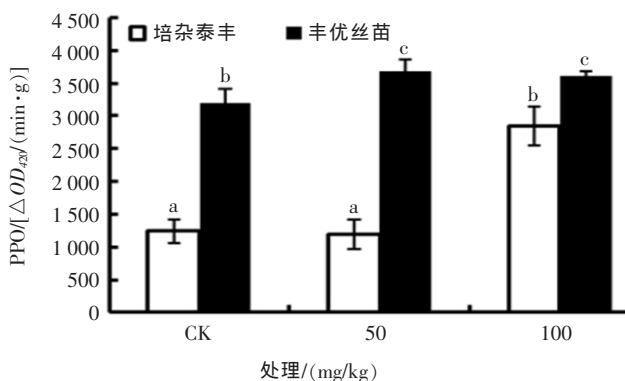


图3 不同处理对水稻多酚氧化酶活性的影响
Fig. 3 Effects of different DEHP treatments on PPO activities of rice

3 讨论与结论

3.1 讨论

生物量被认为是植物受到污染物毒害最好的指示物^[21]。污染物对植物生物量的影响与其浓度、植物种类以及生长期等有关^[22]。有研究发现，低浓度 DEHP 或 DBP 处理促进植物生长，高浓度则抑制生长^[8,13]。本研究中 DEHP 处理的生物量均比空白对照的低，说明 DEHP 胁迫抑制水稻生长。当植物受到 DEHP 胁迫时，会激发植物自身的防御体系，诱导 POD 活性增大以应对 DEHP 胁迫导致的体内氧自由基增加。类似的，有研究发现 DBP 和 DEHP 胁迫下绿豆 POD 活性随着污染物浓度的增大而呈现上升趋势，但达到最大值后，随污染物浓度增大 POD 活性降低。这可能由于高浓度污染下产生的自由基数量超出了 POD 的清除能力而对植物造成伤害^[13,23]。这说明 POD 活性存在一个阈值，对植物的保护作用存在一定的限度。本研究中 POD 活性一直保持上升的趋势，可能是因为本研究水稻体内 DEHP 产生的自由基数量尚未超出 POD 的清除能力。

当植物吸收外源污染物后，体内的一些特定酶如酚氧化酶、氧化物酶、P450 单加氧酶等，能对体内的外源污染物进行转化/代谢^[24-25]。例如，Gong 等^[26]研究发现，PPO 主导了高羊茅(*Festuca Arundinacea*)体内多环芳烃的降解。本研究中，低浓度 DEHP 处理下培杂泰丰的 PPO 活性与对照间差异不显著，而丰优丝苗的 PPO 活性显著高于其对照，这可能是因为不同品种水稻对 DEHP 胁迫产生应激反应不同^[22]。同一 DEHP 水平下，丰优丝苗的 PPO 活性显著高于培杂泰丰的，可能影响水稻体内 DEHP 的降解进而导致前者体内 DEHP 含量较低。

2 个品种水稻体内丙二醛含量基本保持不变

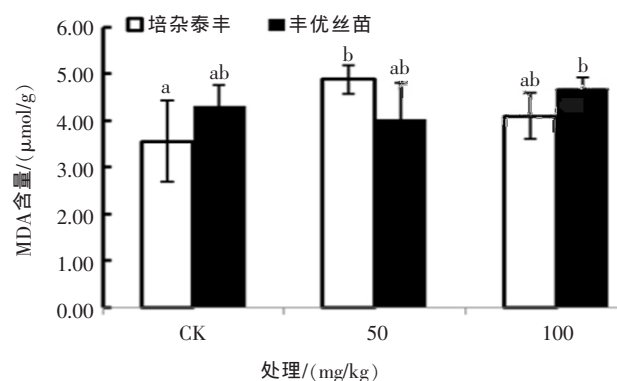


图4 不同处理对水稻丙二醛含量的影响
Fig. 4 Effects of different DEHP treatments on MDA contents of rice

(图4), 但其过氧化物酶和多酚氧化酶活性则随 DEHP 浓度的增加而升高。这可能是因为水稻受到 DEHP 胁迫导致其体内活性氧自由基增加, 地上部出现应激防御, 提高 POD 和 PPO 活性, 及时清除植物体内多余的活性氧自由基并降解 DEHP, 从而使 MDA 含量保持稳定, 但具体原因有待进一步深入研究。

3.2 结论

DEHP 胁迫下, 培杂泰丰和丰优丝苗生物量均随着 DEHP 浓度的升高而降低, 说明 50 mg/kg DEHP 会抑制 2 种水稻的生长。培杂泰丰和丰优丝苗体内的 DEHP 含量均随着 DEHP 浓度的升高而升高, 说明 2 种水稻对 DEHP 均有累积效应, 且 DEHP 更易被根系累积或滞留。

DEHP 胁迫下, 培杂泰丰和丰优丝苗体内的 MDA 含量基本保持不变, 但 POD 和 PPO 活性均升高。丰优丝苗和培杂泰丰的 POD 和 PPO 活性变化规律不同, 前者的 POD 活性比后者的高, 可能影响到 DEHP 在水稻体内降解进而导致前者体内 DEHP 含量较低。

参考文献

[1] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015: 41.

[2] 中国环境保护部. 第一次全国污染源普查公报[R]. 2010: 10.

[3] Mo C H, Cai Q Y, Zeng Q Y. Occurrence of priority organic pollutants in the fertilizers, China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 152(3): 1 208-1 213.

[4] Cai Q Y, Mo C H, Wu Q T, et al. The status of soil contamination by semivolatil organic chemicals(SVOCs)in China: A review[J]. Science of the Total Environment, 2008, 389(2-3): 209-224.

[5] Niu L L, Xu Y, Xu C, et al. Status of phthalate esters contamination in agricultural soils across China and associated health risks[J]. Environmental Pollution, 2014, 195: 16-23.

[6] 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): 2 308-2 312.

[7] Zhao H M, Du H, Xiang L, et al. Physiological differences in response to di-n-butyl phthalate(DBP)exposure between low- and high-DBP accumulating cultivars of Chinese flowering cabbage (*Brassica parachinensis* L.)[J]. Environmental Pollution, 2016, 208: 840-849.

[8] Zhao H M, Du H, Xiang L, et al. Variations in phthalate ester (PAE)accumulation and their formation mechanism in Chinese flowering cabbage(*Brassica parachinensis* L.)cultivars grown on PAE-contaminated soils[J]. Environmental Pollution, 2015, 206: 95-103.

[9] Ma T T, Christie P, Luo Y M, et al. Physiological and antioxidant responses of germinating Mung Bean seedlings to phthalate esters in soil[J]. Pedosphere, 2014, 24(1): 107-115.

[9] Mostofa M G, Hossain M A, Fujita M, et al. Physiological and biochemical mechanisms associated with trehalose-induced copper-

stress tolerance in rice[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 11 433.

[10] Edwards W, Bownes R, Leukes W D, et al. A capillary membrane bioreactor using immobilized polyphenol oxidase for the removal of phenols from industrial effluents[J]. Enzyme and Microbial Technology, 1999, 24: 209-217.

[11] Constabel C P, Bergey D R, Ryan C A. System in activates synthesis of wound-inducible tomato leaf polyphenol oxidase via the octadecanoid defense signaling pathway[J]. PNAS, 1995, 92: 407-411.

[12] Kwak S S, Kim S K, Park I H, et al. Enhancement of peroxidase activity by stressed-related chemicals in sweet potato[J]. Phytochemical Analysis, 1996, 43: 565-568.

[13] Ma T T, Christie P, Teng Y, et al. Rape(*Brassica chinensis* L.) seed germination, seedling growth, and physiology in soil polluted with di-n-butyl phthalate and bis(2-ethylhexyl)phthalate[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20: 5 289-5 298.

[14] Winston G W. Oxidants and antioxidants in aquatic animals[J]. Comparative Biochemistry and Physiology, 1991, 100: 173-176.

[15] 严重玲, 洪业汤, 付舜珍, 等. Cd、Pb 胁迫对烟草叶片中活性氧清除系统的影响[J]. 生态学报, 1997, 17(5): 488-492.

[16] Cai Q Y, Xiao P Y, Chen T, et al. Genotypic variation in the uptake, accumulation, and translocation of di-(2-ethylhexyl) phthalate by twenty cultivars of rice(*Oryza sativa* L.)[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, 116: 50-58.

[17] 陈桐, 蔡全英, 吴启堂, 等. PAEs 胁迫对高/低累积品种水稻根系形态及根系分泌低分子有机酸的影响[J]. 生态环境学报, 2015, 24(3): 494-500.

[18] Ma T T, Christie P, Luo Y M, et al. Physiological and antioxidant responses of germinating Mung Bean seedlings to phthalate esters in soil[J]. Pedosphere, 2014, 24(1): 107-115.

[19] Wang J, Yuan J, Yang Z, et al. Variation in cadmium accumulation among 30 cultivars and cadmium subcellular distribution in 2 selected cultivars of water spinach(*Ipomoea aquatica* Forsk.)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57: 8 942-8 949.

[20] John K S, Bhat S G, Rao UJSP, et al. Isolation and partial characterization of phenol oxidases from *Mangifera indica* L. sap(latex)[J]. Journal of molecular catalysis B-enzymatic, 2011, 68: 30-36.

[21] Shi G R, Cai Q S. Cadmium tolerance and accumulation in eight potential energy crops[J]. Biotechnology Advances, 2009, 27: 555-561.

[22] Xin J, Huang B, Liu A, et al. Identification of hot pepper cultivars containing low Cd levels after growing on contaminated soil: uptake and redistribution to the edible plant parts[J]. Plant soil, 2013, 373: 415-425.

[23] Liu W L, Zhang C B, Liu S Y. Effects of phthalate ester treatment on seed germination and antioxidant enzyme activities of *Phaseolus radiatus* L.[J]. Bulletin of Environment Contamination and Toxicology, 2014, 92: 621-624.

[24] Kvesitadze E, Sadunishvili T, Kvesitadze G. Mechanisms of organic contaminant uptake and degradation in plants[J]. World Acad Sci Eng Technol, 2009, 55: 458-468.

[25] Schroder P. Phytoremediation: Methods and reviews[M]. Totowa: Humana Press, 2007: 251-263.

[26] Gong S S, Han J, Gao Y Z, et al. Effects of inhibitor and safener on enzyme activity and phenanthrene metabolism in root of tall fescue[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31: 4 027-4 033.

责任编辑: 赵军明