

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2017.03.2016070101

张晓丹, 才满, 张爽, 等. 4-BDE 胁迫对毛白杨组培苗不定根发生的影响[J]. 环境化学, 2017, 36(3): 514-520.

ZHANG Xiaodan, CAI Man, ZHANG Shuang, et al. Effects of 4-BDE on adventitious rooting of tissue culture seedlings of *Populus tomentosa* [J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(3): 514-520.

## 4-BDE 胁迫对毛白杨组培苗不定根发生的影响\*

张晓丹<sup>1,2</sup> 才 满<sup>1,2</sup> 张 爽<sup>1,2</sup> 杜克久<sup>1,2\*\*</sup>

(1. 河北农业大学, 保定, 071001; 2. 河北省林木种子资源与森林保护重点实验室, 保定, 071001)

**摘 要** 为了解一溴代联苯醚(4-monobrominated diphenyl ether, 4-BDE)的植物修复机制, 本文研究了不同浓度 4-BDE 处理对毛白杨组培苗不定根的形态、分化状况、细胞组织学以及部分生理特性的影响. 发现一定浓度的 4-BDE 处理对毛白杨组培苗不定根的分化表现出先抑制后促进的效应, 说明 4-BDE 可能具有一定的植物生长素生物效应. 在 4-BDE 的诱导处理下, 组培苗不定根的颜色变深, 300 mg·L<sup>-1</sup> 时根呈黑褐色且受到明显的伸长抑制, 但并未坏死. 与对照相比, 4-BDE 诱导处理的毛白杨组培苗不定根的显微结构发生明显变化, 表现为根皮层细胞内含物增多, 皮层细胞排列变紧密. 高浓度 30 mg·L<sup>-1</sup> 4-BDE 处理 23 d 的组培苗不定根丙二醛(MDA)含量显著高于处理 47 d 和 58 d 的 ( $P < 0.05$ ); 相同处理时间 30 mg·L<sup>-1</sup> 4-BDE 处理的过氧化物酶(POD)活性显著高于对照组 ( $P < 0.05$ ). 随着处理时间的延长, 3 mg·L<sup>-1</sup> 4-BDE 处理的组培苗不定根的 MDA 含量呈现先上升后下降的趋势, POD 活性呈逐渐上升的趋势. 以上结果初步显示, 毛白杨组培苗不定根对 4-BDE 胁迫具有一定的适应能力.

**关键词** 毛白杨, 组培苗, 不定根分化, 生理特性, 4-BDE.

## Effects of 4-BDE on adventitious rooting of tissue culture seedlings of *Populus tomentosa*

ZHANG Xiaodan<sup>1,2</sup> CAI Man<sup>1,2</sup> ZHANG Shuang<sup>1,2</sup> DU Kejiu<sup>1,2\*\*</sup>

(1. Agricultural University of Hebei, Baoding, 071001, China; 2. Key Laboratory of Tree Species Germplasm Resource and Forest Protection of Hebei Province, Agricultural University of Hebei, Baoding, 071001, China)

**Abstract:** In order to understand the mechanisms of phytoremediation of 4-BDE (4-monobrominated diphenyl ether), the effects of 4-BDE on adventitious roots differentiation, phytocytology and some physiological-biochemical characteristics on tissue culture plantlet of *Populus tomentosa* were investigated. The results showed that 4-BDE promoted the differentiation of adventitious roots after an initial inhibition in a certain concentration range, which indicated that 4-BDE might have a certain biological effect on plant growth hormone. The adventitious roots under the exposure of 4-BDE became dark in color in comparison with the control, and 300 mg·L<sup>-1</sup> 4-BDE had a remarkable restraining effect on the length of adventitious roots. Compared with the control, the microstructure of adventitious roots treated with 4-BDE changed significantly. The cellular contents within adventitious roots increased and the cortical cells became closely arranged. In addition, for 30 mg·L<sup>-1</sup> 4-BDE

2016 年 7 月 1 日收稿 (Received: July 1, 2016).

\* “十二五”农村领域国家科技计划课题(2012AA101403), 环境化学与生态毒理学国家重点实验室开放基金课题(KF2009-03)和国家自然科学基金项目(30972384)资助.

**Supported by** the National High Technology Research and Development Program of China(2012AA101403), the State Key Laboratory of Environmental Chemistry and Ecotoxicology(KF2009-03) and National Natural Science Foundation of China(30972384).

\*\* 通讯联系人, Tel: 13833072220, E-mail: dukejiu@126.com

**Corresponding author**, Tel: 13833072220, E-mail: dukejiu@126.com

treatment, MDA (Malondialdehyde) content of adventitious roots on 23th day was significantly higher than the content on 47th day and 58th day ( $P < 0.05$ ); For the same treatment time, POD (Peroxidase) activity in adventitious roots under  $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  4-BDE treatment was higher than that of the control ( $P < 0.05$ ). Under  $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  4-BDE treatment, the MDA content first increased with treatment time and then decreased, while POD activity presented a gradually increasing trend. These results showed that the adventitious roots of tissue culture plantlet of *P. tomentosa* had a certain adaptability to 4-BDE stress.

**Keywords:** *Populus tomentosa*, tissue culture seedling, adventitious roots differentiation, physiological property, 4-BDE.

多溴联苯醚 (Polybrominated diphenyl ethers, PBDEs) 是溴代阻燃剂的一种<sup>[1]</sup>, 被广泛应用于化工、交通、建材、纺织、电子、石油和采矿等领域<sup>[2-6]</sup>. PBDEs 在环境中难降解, 滞留时间长, 具有强亲脂憎水性<sup>[7]</sup>, 可沿食物链逐级放大<sup>[8-9]</sup>并可在环境中远距离迁移. 目前已经在各种环境介质 (如大气、沉积物、土壤<sup>[10]</sup>、室内空气<sup>[11-12]</sup>和各种生物体等) 和人体中<sup>[13-14]</sup>检测出 PBDEs 的存在<sup>[15-17]</sup>. PBDEs 在环境介质中或在生物体内可通过光照和微生物代谢作用还原脱溴为毒性更高的低溴代联苯醚, 最终还原产物是一溴代联苯醚<sup>[18-20]</sup>; 4-BDE (4-monobrominated diphenyl ether) 是一溴代联苯醚同系物中得到最多关注的化合物<sup>[19]</sup>, 是重要的环境持久性有机污染物, 已作为生物修复 PBDEs 研究中重要的低溴代模式同系物<sup>[21]</sup>. 目前, 环境中降解 4-BDE 主要集中在微生物降解<sup>[21-22]</sup>和光降解<sup>[23]</sup>, 植物降解修复 4-BDE 的研究尚少报道.

植物修复技术是指利用植物在生长过程中吸收、降解、钝化有机污染物的一种原位处理污染土壤的方法. 植物在土壤非生物逆境胁迫条件下, 最先感受逆境胁迫的器官是根系, 而植物可以通过改变根系的形态和结构来适应环境胁迫<sup>[24-25]</sup>. 因此, 根系作为直接接触污染物的植物器官, 在降解吸收 4-BDE 方面起着十分重要的作用.

本研究采用毛白杨 (*Populus tomentosa* Carr.) 组培苗为试验材料, 研究 4-BDE 处理对毛白杨组培苗不定根的形态学、细胞组织学、生理生化特性以及不定根分化状况方面的影响, 以期为进一步研究有机污染物修复机制提供科学依据, 为建立环境修复技术奠定理论基础.

## 1 材料与方法 (Materials and methods)

### 1.1 试验材料

采用河北农业大学植物修复实验室保存的毛白杨 (*Populus tomentosa* Carr.) 组培苗作为植物材料.

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 4-BDE 对毛白杨组培苗的暴露胁迫试验

挑选生长良好且发育一致的毛白杨 (*Populus tomentosa* Carr.) 组培苗作为试验材料. 取毛白杨组培苗的相同部位, 将其修剪成 2 cm 长、无顶芽、具 2 片叶的茎段, 分别继代转入添加不同浓度 ( $3$ 、 $30$ 、 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 4-BDE 的  $1/2\text{MS} + 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  3-吲哚丁酸 (IBA) 的培养基中, 以不添加 4-BDE 的  $1/2\text{MS} + 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  IBA 培养基作为对照, 进行不定根分化培养. 严格要求使用同样大小的三角瓶和塑料膜、同样长短的捆绑绳和对诱导后的组培苗进行同样的光照, 试验中每个处理均设置 5 个重复. 组培室采用 450—680 nm LED 光源, 光照强度为  $250 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 光暗周期为 16/8 h, 温度为  $(25 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### 1.2.2 毛白杨组培苗不定根的发生及形态学研究

在培养过程中观察并记录毛白杨组培苗的生根状况以及不定根的形态变化并照相. 在培养的第 58 天统计组培苗的生根数量并记录.

#### 1.2.3 毛白杨组培苗不定根的显微结构观察

分别在培养组培苗的第 23、47、58 d 取样. 将不同处理的毛白杨组培苗不定根根尖切成 5 mm 左右的根段, 放入 FAA 固定液中固定 24 h 后, 通过对植物材料进行脱水、透明、浸蜡、包埋处理进行石蜡制

片,然后用切片机切成厚度为 10  $\mu\text{m}$  的薄片,再经过粘片与展片、脱蜡与透明步骤后进行番红-固绿染色,最后使用加拿大树胶进行封片<sup>[26]</sup>.封片完成后,使用 Axio Imager A2 荧光显微镜(德国 Carl Zeiss Jena)观察不同处理的组培苗不定根的显微结构变化并照相.

#### 1.2.4 毛白杨组培苗不定根的生理指标的测定

采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含量;用愈创木酚法进行过氧化物酶(Peroxidase, POD)活性的测定<sup>[27]</sup>.

#### 1.2.5 数据分析

采用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS17.0 统计分析软件进行数据分析及差异显著性检验.

## 2 结果与讨论(Result and discussion)

### 2.1 4-BDE 对毛白杨组培苗不定根形态的影响

不同浓度 4-BDE 处理对毛白杨不定根形态的影响显著(图 1).随着 4-BDE 处理浓度的增加,毛白杨组培苗不定根的颜色逐渐加深,30、300  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  4-BDE 处理,组培苗不定根的褐化程度随处理时间的延长而逐渐加剧.高浓度 300  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  4-BDE 处理组培苗的不定根呈黑褐色、不定根的伸长生长受到明显抑制,但尚未致死.说明毛白杨组培苗不定根对 4-BDE 的胁迫具有一定的适应能力.张佩华等<sup>[28]</sup>研究表明,在高浓度萘(NAP)、菲(PHN)、芘(PYE)处理,植物根系的生长都会受到伸长抑制.与本试验结果相似.

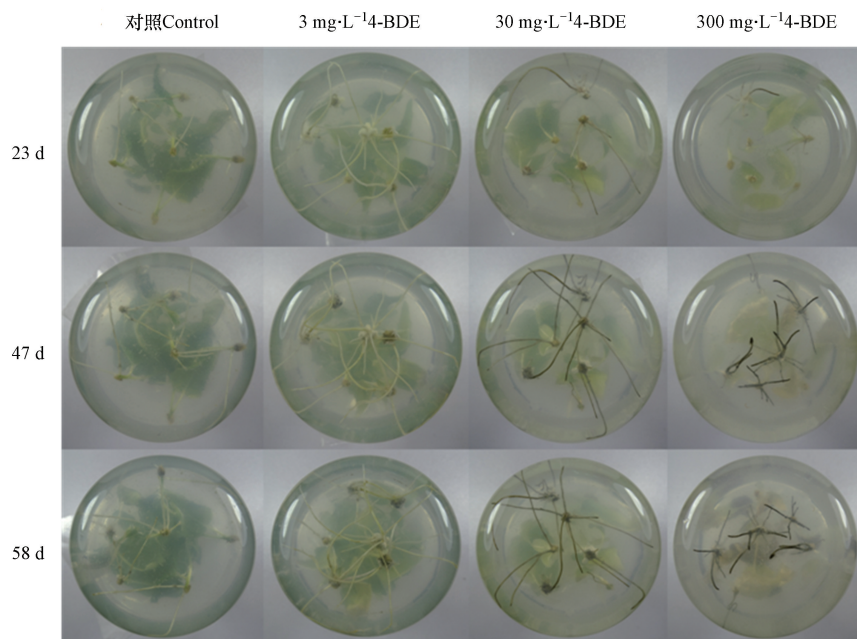


图 1 不同浓度与时间 4-BDE 处理后毛白杨组培苗不定根的形态变化

Fig.1 Morphological changes of adventitious roots of *P.tomentosa* seedlings under different 4-BDE concentrations

### 2.2 4-BDE 处理对毛白杨组培苗不定根分化的影响

不同浓度 4-BDE 处理对毛白杨组培苗不定根分化时间和生根数量有显著影响(表 1,图 2).初根时间为不同处理的毛白杨组培苗茎段首先形成不定根的时间,不定根分化达 100%的时间为不同处理的茎段均形成不定根的时间.3、30、300  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  4-BDE 处理,毛白杨组培苗初根形成时间分别比对照苗晚 2、3、5 d,说明不同浓度 4-BDE 处理初期对毛白杨组培苗不定根的分化具有抑制作用.随着 4-BDE 处理时间的延长,3、30  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  4-BDE 处理的组培苗的不定根分化率达 100%的时间分别比对照苗提前 7 d 和 6 d,与对照存在显著性差异,对毛白杨组培苗不定根的分化表现出促进效应.而 300  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  4-BDE 处理的不定根分化率达 100%的时间与对照的差异不显著.不同浓度(3、30、300  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 4-BDE 处理后毛白杨组培苗不定根的生根数量均显著高于对照苗( $P<0.05$ )(图 1、2),30  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  4-BDE 处理,组培苗平均

生根数量为 7.0, 达最高值, 是对照的 2.3 倍。而  $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  4-BDE 处理的不定根数量与  $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时无显著性差异(图 2), 进一步说明 4-BDE 处理对毛白杨组培苗不定根的分化具有促进作用。4-BDE 对毛白杨组培苗不定根的分化表现出的先抑制后促进的生物效应说明暴露初期培养基中高浓度 4-BDE 抑制不定根的分化, 随着暴露时间延长, 毛白杨组培苗在不定根分化过程中可能具有吸收、转移并代谢移除 4-BDE 的能力, 使培养基中 4-BDE 的浓度降低, 从而促进了不定根的分化, 推测 4-BDE 可能具有一定的植物生长素生物效应, 并可能与毛白杨组培苗不定根分化培养基中植物生长素 IBA 协同促进不定根分化。本研究中低浓度 4-BDE 对毛白杨不定根分化促进、高浓度抑制的生物学效应符合内源植物生长素影响器官分化的作用机制, 即低浓度可以促进生长, 高浓度则会抑制生长, 甚至使植物死亡。植物激素只有在一定的浓度范围内, 才具有明显的促进植物不定根分化的效应, 当超过促进生根的最适浓度时, 则会抑制植物不定根的分化<sup>[29-30]</sup>。在多环芳烃(PAHs)对豌豆和玉米的根生长影响<sup>[31]</sup>, 邻苯二甲酸酯(PAEs)对水稻根系生长影响<sup>[32]</sup>的研究中均有类似报告。

表 1 不同浓度 4-BDE 处理对毛白杨组培苗不定根分化时间的影响

Table 1 Effect on the differentiation of adventitious roots of *P.tomentosa* seedlings under different concentrations of 4-BDE

4-BDE 浓度 4-BDE concentration/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	初根形成时间 Formation time of an initial root/d	不定根分化率达 100% 的时间 Period reaching 100% of adventitious roots differentiation rate/d
0	$5 \pm 0.55^c$	$19 \pm 1.30^a$
3	$7 \pm 0.54^{bc}$	$12 \pm 0.83^b$
30	$8 \pm 0.84^b$	$13 \pm 1.34^b$
300	$10 \pm 1.64^a$	$20 \pm 1.64^a$

注:表中数据为平均值 $\pm$ 标准差;不同小写字母表示每列数据间的差异显著性( $P < 0.05$ )。

Note: The data is mean value  $\pm \sigma$ ; Different lowercase letters indicate the significant differences between each rank of data ( $P < 0.05$ ).

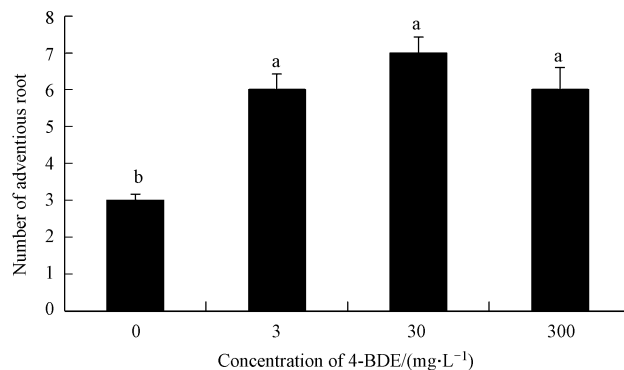


图 2 不同浓度 4-BDE 对毛白杨组培苗不定根生根数量的影响

不同小写字母表示数据间差异显著性( $P < 0.05$ )

Fig.2 Effect on the number of adventitious roots of *P.tomentosa* seedlings under different concentrations of 4-BDE

### 2.3 4-BDE 处理对毛白杨组培苗不定根显微结构的影响

不同浓度 4-BDE 处理对毛白杨组培苗不定根显微结构有一定的影响(图 3)。随着 4-BDE 处理浓度的增加, 毛白杨组培苗不定根皮层细胞的排列逐渐从疏松变为紧密。对照与  $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  4-BDE 处理的根表皮细胞完整, 皮层细胞排列疏松、细胞间隙大。 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  与  $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  4-BDE 处理的根皮层细胞排列紧密、细胞间隙小、细胞内含物多。这可能是毛白杨组培苗在不定根分化过程中对 4-BDE 胁迫的适应性反应。在相同的 4-BDE 处理浓度下, 不定根的显微结构随处理时间的延长无明显变化。蔡新华等<sup>[33]</sup>研究发现, 在重金属离子(镉、铜、汞)胁迫下, 随重金属离子浓度的上升, 小麦根皮层细胞的排列变紧密、细胞间隙发育不充分, 与本研究的结果一致。不同浓度 4-BDE 处理对不定根显微结构产生一定的影响, 但细胞结构完整、未遭到破坏, 与 4-BDE 处理对不定根有一定程度的褐化影响, 但尚未致死反映的结果相一致。进一步说明毛白杨组培苗不定根对 4-BDE 胁迫具有一定的适应能力。

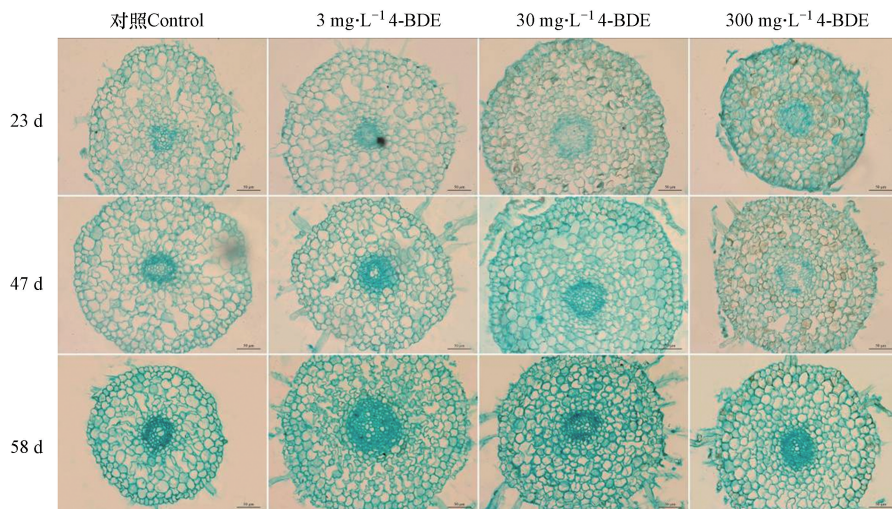


图3 不同浓度 4-BDE 处理下毛白杨组培苗根横切显微结构图

Fig.3 Microscopic structure of the adventitious roots of *P. tomentosa* seedlings under different concentrations of 4-BDE

#### 2.4 4-BDE 处理对毛白杨组培苗不定根的生理指标的影响

POD 是植物体内抗氧化酶系统的重要组成部分,它能催化有毒物质的分解,其活性高低能反映植物受害的程度<sup>[34]</sup>.MDA 是细胞膜脂质过氧化的最终分解产物,它的产生能加剧膜的损伤,MDA 含量可以反映植物遭受逆境伤害的程度<sup>[35-36]</sup>.不同浓度 4-BDE 处理对毛白杨组培苗不定根的过氧化物酶(POD)活性和丙二醛(MDA)含量有显著影响(图4).随着 4-BDE 处理时间的延长,处理组的 POD 活性值呈逐渐上升趋势.相同处理时间,高浓度 30 mg·L<sup>-1</sup> 4-BDE 处理的 POD 活性显著高于对照组( $P<0.05$ ) (图4).说明 4-BDE 胁迫能促进毛白杨组培苗不定根 POD 酶活性的上升,使不定根的抗氧化能力增强、解毒能力增强,从而降低了其自身的受害程度.随着 4-BDE 处理时间的延长,3 mg·L<sup>-1</sup> 4-BDE 处理的不定根的 MDA 含量呈现先上升后下降的趋势.30 mg·L<sup>-1</sup> 4-BDE 处理的 47 d 和 58 d 组培苗不定根的 MDA 含量显著低于 23 d 的( $P<0.05$ ),分别相差 1.45 倍和 1.36 倍(图4).随着 4-BDE 处理时间的延长 MDA 水平呈下降趋势,说明毛白杨组培苗体内的抗逆境系统产生效果,毛白杨组培苗可以通过自身调节机制来适应 4-BDE 的胁迫环境,使自身受害程度减小.

综合分析 4-BDE 对毛白杨组培苗不定根的形态、显微结构以及生理指标的影响,发现毛白杨组培苗在发生过程中对 4-BDE 胁迫有一定的适应能力.毛白杨组培苗对 4-BDE 胁迫的适应性反应是一个非常复杂的生理生化过程,其形态结构的变化与生理指标的变化联系紧密,有关机理还有待进一步的研究.

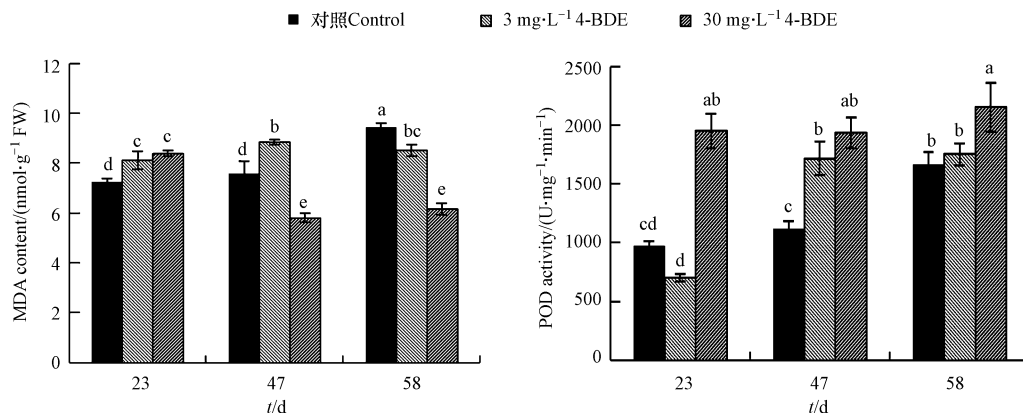


图4 不同浓度 4-BDE 处理下毛白杨组培苗不定根 MDA 含量和 POD 活性的变化  
不同小写字母表示数据间差异显著性( $P<0.05$ )

Fig.4 Changes of MDA contents and POD activities in adventitious roots of *P. tomentosa* seedlings under different concentrations of 4-BDE

### 3 结论 ( Conclusion )

在本实验设定的 4-BDE 处理浓度范围内,4-BDE 处理后毛白杨组培苗不定根的颜色加深、皮层细胞间隙发育不充分,但细胞结构未遭到破坏,不定根未坏死,且 4-BDE 处理后毛白杨组培苗不定根的 POD 活性升高,MDA 含量先上升后下降,这说明毛白杨组培苗不定根可能通过自身调节机制来降低受害程度,对 4-BDE 胁迫具有一定的适应能力。

通过 4-BDE 处理对毛白杨组培苗不定根分化的研究发现,随着 4-BDE 处理时间的延长,4-BDE 对毛白杨组培苗不定根的分化表现出先抑制后促进的效应,可能具有一定的植物生长素生物效应,其作用机制有待进一步研究。

#### 参考文献 ( References )

- [ 1 ] 李子扬,陈永亨.多溴联苯醚的环境行为及其生态毒理效应[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(1): 97-105.  
LI Z Y, CHEN Y H. The Environmental behavior and ecotoxicological effects of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) [J]. Science Technology and Environmental, 2011, 11(1): 97-105 (in Chinese).
- [ 2 ] HOH E, ZHU L Y, HITES R A. Novel flame retardants, 1, 2-bis ( 2, 4, 6 -tribromophenoxy ) ethane and 2, 3, 4, 5, 6-pentabromoethylbenzene in United States' environmental samples[J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39 ( 8 ):2472-2477.
- [ 3 ] 程吟文,谷成刚,王静婷,等.多溴联苯醚微生物降解过程与机理的研究进展[J].环境化学,2015,34(4):637-648.  
CHENG Y W, GU C G, WANG J T, et al. Recent advances in mechanism and processes of microbial degradation of polybrominated diphenyl ethers [J].Environmental Chemistry, 2015, 34(4):637-648 (in Chinese).
- [ 4 ] 薛铮然,李海静.高效溴系阻燃剂十溴联苯醚生产工艺研究[J].山东化工, 2002, 31, (4):31-32.  
XUE Z R, LI H J. The productive mechanism and technology research of new highly efficiency flame retardant of decabromodiphehyl Ether [J]. Shandong Chemical Industry, 2002, 31, (4): 31-32 (in Chinese).
- [ 5 ] 郝迪,亦如瀚,吴昊,等.贵屿地区不同类型农业土壤多溴联苯醚的污染特征和暴露评估[J].农业环境科学学报,2015,34(5):882-890.  
HAO D, YI R H, WU Y, et al. Pollution characteristics and exposure risk assessment of polybrominated diphenyl ethers in different types agricultural soils in guiyu area[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015,34(5):882-890 (in Chinese).
- [ 6 ] 曾光明,刘敏茹,陈耀宁,等.土壤中多溴联苯醚研究进展[J].土壤学报,2014,51(5):934-943.  
ZENG G M, LIU M R, CHEN Y N, et al. Advancement in research on Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2014,51(5):934-943 (in Chinese).
- [ 7 ] 齐彭德,陆光华,梁艳,等.多溴联苯醚的生物效应研究[J].环境科学与技术, 2011, 34(11):11- 17.  
QI P D, LU G H, LIANG Y, et al. Biological effects of polybrominated diphenyl ethers in organism and human [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(11):11- 17 (in Chinese).
- [ 8 ] HU G C, DAI J Y, XU Z C, et al. Bioaccumulation behavior of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in the freshwater food chain of Baiyangdian Lake, North China [J]. Environment International, 2010, 36(4):309-315.
- [ 9 ] WU J P, LUO X J, ZHANG Y, et al. Bioaccumulation of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in wild aquatic species from an electronic waste (e-waste) recycling site in South China [J]. Environment International, 2008, 34 ( 8 ): 1109-1113.
- [ 10 ] MA J, QIU X H, ZHANG J L, et al. State of polybrominated diphenyl ethers in China: An overview [J]. Chemosphere, 2012, 88 ( 7 ): 769-778.
- [ 11 ] HUANG Y, CHEN L, PENG X, et al. PBDEs in indoor dust in South-Central China: Characteristics and implications [J]. Chemosphere, 2010, 8(2):169-174.
- [ 12 ] WANG J, MA Y J, CHEN S J, et al. Brominated flame retardants in house dust from e-waste recycling and urban areas in South China: Implications on human exposure [J]. Environment International, 2010, 36(6):535-541.
- [ 13 ] 赵云峰,张锐,张磊,等. 2007 年北京地区母乳中多溴联苯醚污染水平的分析[J].卫生研究, 2010, 39(3):326-330.  
ZHAO Y F, ZHANG R, ZHANG L, et al. Polybrominated dipenyl ethers (PBDEs) in breast milk samples from Beijing in 2007 [J]. Journal of Hygiene Research, 2010, 39(3):326-330 (in Chinese).
- [ 14 ] TAKUMI T, KURUNTHACHALAM SR, HIROAKI T. Impact of fermented brown rice with *Aspergillus oryzae* (FEBRA) intake and concentrations of polybrominated diphenylethers (PBDEs) in blood of humans from Japan [J]. Chemosphere, 2004, 57(8):795- 811.
- [ 15 ] DE WIT C.A. An overview of brominated flame retardants in the environment [J]. Chemosphere, 2002, 46(5): 583-624.
- [ 16 ] MUIR D C G, BACKUS S, DEROCHE A E, et al. Brominated flame retardants in polar bears (*Ursus maritimus*) from Alaska, the Canadian Arctic, East Greenland and Svalbard [J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(2): 449-455.

- [17] 周冰,仇雁翎.多溴联苯醚及其环境行为[J].环境科学与技术,2008,31(5):57-61.  
ZHOU B, CHOU Y L. Polybrominated diphenyl ether s and its environmental behavior[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31(5):57-61(in Chinese).
- [18] ROBROCK K R, KORYTAR P, ALVAREZ-COHEN L. Pathways for the anaerobic microbial debromination of polybrominated diphenyl ethers[J].Environmental Science&Technology,2008,42(8):2845-2852.
- [19] FANG L,HUANG J,YU G, et al. Photochemical degradation of six polybrominated diphenyl ether congeners under ultraviolet irradiation in hexane[J].Chemosphere,2008,71(2): 258-267.
- [20] 郭杨,王世和.多溴联苯醚的微生物降解研究[J].中国沼气,2008,26(4):3-6.  
GUO Y, WANG S H. Biodegradation of polybrominated diphenyl ethers[J].China Biogas, 2008,26(4): 3-6(in Chinese).
- [21] SHIH Y, CHOU H L, PENG Y H. Microbial degradation of 4-monobrominated diphenyl ether with anaerobic sludge [J]. Journal of Hazardous Materials,2012,213-214:341-346.
- [22] RICHARDSON V M, STASKAL D F, ROSS D G, et al. Possible mechanisms of thyroid hormone disruption in mice by BDE-47, a major polybrominated diphenyl ether congener[J].Toxicology and Applied Pharmacology,2008,226(3):244-250.
- [23] MILANO J C, YASSIN HUAAN S, VERNET J L. Photochemical degradation of 4-bromodiphenyl ether: Influence of hydrogen peroxide [J].Chemosphere,1992,25(30):353-360.
- [24] 田生科,李廷轩,彭红云,等.铜胁迫对海州香薷和紫花香薷根系形态及铜富集的影响[J].水土保持学报,2005,19(3):97-100,183.  
TIAN S K,LI Y X,PENG H Y, et al. Influence of Cu toxicity on root morphology and Cu accumulation of *Elsholtzia splendens* and *Elsholtzia argyi*[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2005,19(3):97-100,183(in Chinese).
- [25] 李锋,李木英,潘晓华,等.不同水稻品种幼苗适应低磷胁迫的根系生理生化特性[J].中国水稻科学,2004,18(1):48-52.  
LI F,LI M Y,PAN X H, et al. Biochemical and physiological characteristics in seedlings roots of different rice cultivars under low-phosphorus stress[J]. Chinese J Rice Sci,2004,18(1):48-52(in Chinese).
- [26] 李和平.植物显微技术[M].北京:科学出版社,2009.  
LI H P. Plant microtechnology [M].Beijing: Science Press, 2009(in Chinese).
- [27] 余前媛.植物生理学实验教程[M].北京:北京理工大学出版社,2014.  
YU Q Y. Plant Physiology experiment course [M].Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2014(in Chinese).
- [28] 张佩华,韦颖,李鹏善,等.苍耳在PAHs胁迫下的根系响应[J].江苏农业科学,2015,43(11):458-461.  
ZHANG P H,WEI Y,LI P S, et al. Responses of *Xanthium sibiricum Patr in ex Widder* roots under the stress of PAHs [J].Jiangsu Agricultural Sciences, 2015,43(11):458-461(in Chinese).
- [29] 李静,郭伟,李青,等.植物激素对毛白杨叶片不定根再生的影响[J].山东农业科学,2007,(3):58-59.  
LI J, GUO W,LI Q, et al. Effects of plant hormones on adventitious root regeneration of leaves of *Populus tomentosa* [J].Shandong Agricultural Sciences,2007,(3):58-59(in Chinese).
- [30] 王金祥,陈碧丽,廖红,等.生长素、乙烯和一氧化氮对拟南芥下胚轴插条形成不定根调节[J].植物生理学通讯,2009,45(10):986-990.  
WANG J X,CHEN B L,LIAO H, et al. Regulation of auxin, ethylene and nitric oxide on adventitious rooting in *Arabidopsis* hypocotyl cuttings[J].Plant Physiology Communications,2009,45(10):986-990(in Chinese).
- [31] KUMMEROVÁ M, ZEZULKA Š, BABULA P, et al. Root response in pisumsativum and zea mays under fluoranthene stress; Morphological and anatomical traits[J]. Chemosphere, 2013,90(2): 665-673.
- [32] 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量有机酸的影响[J].生态环境学报,2015,24(3):494-500.  
CHEN T,CAI Q Y,WU Q T, et al. Effects of PAE stress on root morphology and low molecular weight organic acid (LMWOC) in root exudates of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars with high- and low-PAE accumulation [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(3): 494-500(in Chinese).
- [33] 蔡新华.重金属胁迫对小麦生长发育的伤害机理研究[D].扬州:扬州大学,2001.  
CAI X H.The study on the inguring mechanism to the growth and development in wheat under the condition of heavy metal stress[D]. Yangzhou:Yangzhou University,2001(in Chinese).
- [34] 张永峰,殷波.混合盐碱胁迫对苗期紫花苜蓿抗氧化酶活性及丙二醛含量的影响[J].草业学报,2009,18(1):46-50.  
ZHANG Y F, YIN B. Influences of salt and alkali mixed stresses on antioxidative activity and MDA content of *Medicago sativa* at seedling stage[J].Acta Pratac Ult Urae Sinica,2009,18(1):46-50(in Chinese).
- [35] 邹琦.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业出版社,2000.  
ZOU Q. Plant physiology experiment instruction [M].Beijing: China Agriculture Press, 2000(in Chinese).
- [36] 郑爱珍,刘传平,沈振国.镉处理下青菜和白菜MDA含量、POD和SOD活性的变化[J].湖北农业科学,2005(1):67-69.  
ZHENG A Z,LIU C P,SHEN Z G. Effect of cadmium on MDA content, POD and SOD activities of *Brassica Pekinensis* and *Brassica Chinensis*[J].Hubei Agricultural Sciences, 2005(1):67-69(in Chinese).