

4-BDE对毛白杨组培苗的显微结构和一些生理指标的影响

才满^{1,2}, 李燕玲¹, 杜克久^{1,2,*}

河北农业大学林学院,²河北省林木种子资源与森林保护重点实验室, 河北保定071000

摘要: 本文研究了4-BDE处理对毛白杨组培苗的形态结构以及生理生化特性的影响。结果表明, 在低浓度4-BDE处理下, 组培苗叶片颜色变浅, 随4-BDE处理浓度增加, 新叶出现失绿白化现象。与对照苗相比, 4-BDE处理的显微结构发生了明显改变, 根的表皮细胞损伤现象严重, 细胞形态变小; 叶肉组织遭到破坏, 海绵组织破坏程度高于栅栏组织; 但茎的结构与正常苗无显著差异。30 mg·L⁻¹ 4-BDE处理23 d的白化叶片比叶重显著低于对照, 其他各处理均无显著差异。叶片中叶绿素含量随4-BDE浓度的升高而下降, 与4-BDE存在显著的浓度抑制关系。30 mg·L⁻¹ 4-BDE处理23 d的毛白杨丙二醛含量则显著低于处理47和58 d的。随着4-BDE处理时间的增加, 过氧化物酶活性显著下降, 而脯氨酸含量呈先降低再升高的趋势。以上结果初步显示, 毛白杨组培苗对低于30 mg·L⁻¹ 4-BDE的污染具有一定的修复能力。

关键词: 4-BDE; 毛白杨组培苗; 形态结构; 生理指标

Effects of 4-BDE on Microstructure and Some Physiological Indexes in *Populus tomentosa* Seedlings

CAI Man^{1,2}, LI Yan-Ling¹, DU Ke-Jiu^{1,2,*}

¹College of Forestry, ²Hebei Provincial Key Laboratories for Germplasm Resources of Forest Trees and Forest Protection, Hebei Agriculture University, Baoding, Hebei 071000, China

Abstract: This research was performed to investigate the effects of 4-BDE on morphological structure and physiological-biochemical characteristics on tissue culture plantlet of *Populus tomentosa*. The results indicated that leaf color became lighter with low concentration of 4-BDE, the new leaves appeared albinism with 4-BDE concentration increased. Comparing with control, seedlings showed significantly abnormal microstructure under 4-BDE treatment. The root epidermis had serious damaged and the size of cells became smaller. Mesophyll tissue was destroyed, the damaged extent of spongy mesophyll tissue was higher than that of palisade. But the microstructure of stem showed no differences. Under 30 mg·L⁻¹ 4-BDE treatment for 23 days, the leaf mass per area of albino leaf was significantly lower than the control, other treatment had no significant difference. With 4-BDE concentration increased, chlorophyll content of leaves decreased, showing definite dose-response relationships. MDA content with 30 mg·L⁻¹ 4-BDE for 23 days was significantly lower than 47 days and 58 days. With 4-BDE treatment time increased, peroxidase activity displayed the decreasing trend, while proline content decreased at first and then increased. The above results showed that *P. tomentosa* seedlings had certain repairing ability in the range of less than 30 mg·L⁻¹ 4-BDE.

Key words: 4-BDE; *Populus tomentosa* seedling; microstructure; physiological indexes

毛白杨为落叶乔木, 是我国分布面积广、适应性强的树种之一, 具易种植、生长速度快、生长耐性强、生物量大、根系发达等特点(Lonardo等2011; Paolis等2011), 是重要的经济用材树种和园林绿化树种。此外, 杨树基因组已被完全测序, 可组织培养繁殖, 能方便地应用于基因工程(Confalonieri等2003; Tuskan等2006)。在以往的研究中, 植物吸收环境污染物的研究多把草本和农作物作为目标植物, 但其生长周期短, 会导致体内环境污染物随残体归还土壤(郑威等2011)。木本植物寿

命长、根系深、生物量大, 在植物修复研究方面有更广阔的前景。利用毛白杨修复环境污染物, 不仅可以美化污染地的景观生态, 而且还能为植物修复分子方面研究提供良好的供试材料。

环境污染物多溴联苯醚(polybrominated di-

收稿 2014-09-30 修订 2014-12-25

资助 “十二五”农村领域国家科技计划课题(2012AA101403)和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)。

* 通讯作者(E-mail: dukejiu@126.com; Tel: 13833072220)。

phenyl ethers, PBDEs)作为工业化阻燃剂,被广泛应用于电子、电器、化工、交通、建材、纺织、石油和采矿等领域(Martin等2004)。研究表明这类有毒溴化物会干扰甲状腺激素,妨碍人类和动物脑部与中枢神经系统的正常发育(Martin等2004)。随着PBDEs的大量使用,在许多环境介质和生物体内均检测到PBDEs的存在,如大气、沉积物或污泥、鱼类、人体血液和脂肪组织、母乳等(De Wit 2006; De Boer等2003; Sellström等1998; Takumi等2004)。PBDEs在环境介质中或在生物体内可通过光照和微生物体内代谢作用还原脱溴为毒性更高的低溴代联苯醚(Söderström等2004; Eriksson等2004; MacDonald 2002; He等2008a, b; Carlsson等2007),最终还原产物是一溴代联苯醚(Robrock等2008; Keum和Li 2005; Fang等2008; Chen等2010; 郭杨和王世和2008; Sierra等2003; Schmidt等1993)。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(Fang等2008),已作为生物修复PBDEs研究中重要的低溴代模式同系物(Shih等2012)。

植物修复环境是生物修复的重要方面。虽然环境污染对植物有一定的影响和危害,但植物可以抵抗和吸收一定浓度范围内的环境污染物质(洪文宁2004)。目前关于环境污染物质多环芳烃(PAHs)和多氯联苯醚(PCBs)对植物生长和生理影响等方面的研究做了许多工作(刘泓等2008; 蔡三山等2013),但迄今为止,尚未有PBDEs处理对植物形态学及解剖学特点及生理生化影响的相关报道。本研究选择PBDEs中较典型的低溴代化合物4-BDE作为研究对象,采用毛白杨组培苗试验体系,研究4-BDE处理对毛白杨组培苗形态学、细胞组织学及生理学的影响,以期为进一步研究有机污染物修复机制提供科学依据。

材料与方法

1 实验材料

选择河北农业大学植物修复实验室保存的毛白杨(*Populus tomentosa* Carr.)组培苗作为供试材料,将其修剪成2 cm长、无顶芽、具3片叶的茎段,分别继代转入添加不同浓度(3和30 mg·L⁻¹) 4-BDE加0.5 mg·L⁻¹ IBA的1/2MS培养基中,进行不定根分

化培养。培养条件为16 h光照/8 h黑暗、光照强度为250 μmol·m⁻²·s⁻¹,温度为(25±2) °C。为避免紫外光对4-BDE的分解,组培室采用450~680 nm LED光源。以培养基1/2MS+0.5 mg·L⁻¹ IBA为对照,试验中每个处理均设置3个重复。分别在培养第23、47和58天取样,测定以下各项生理生化指标。

2 显微结构观察

培养组培苗23 d后,取发育一致的毛白杨组培苗根、茎段及叶片,放入70%的酒精中固定24 h后,用常规方法进行石蜡包埋,用切片机切成厚度10 μm薄片,番红-固绿染色,加拿大树胶封片(李和平2009)。Leica DM4000显微镜下观察并照相。

3 生理生化指标测定

叶片比叶重(leaf mass per area, LMA)测定参考Koch等(2004)方法,分别选取不同4-BDE浓度处理的生长良好的功能叶片,迅速用坐标纸确定叶面积,然后于60 °C烘箱中烘干48 h,称干重。干重除以叶面积得到比叶重(g·m⁻²)。各处理分别选择9片叶子作为重复。

将0.1 g毛白杨组培苗叶片剪碎,用80%丙酮避光抽提36 h,采用722型可见分光光度计,分别在470、646和663 nm波长下测量吸光度,从而测定叶片中叶绿素和类胡萝卜素的含量,每个处理3个重复(李和生2000)。采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量,用愈创木酚法测定过氧化物酶(peroxidase, POD)活性和酸性茚三酮法测定脯氨酸(proline, Pro)含量(刘家尧和刘新2010)。

4 数据统计分析

采用SPSS 17.0、DPS 3.01、Origin 8.5和Photoshop 10.0软件进行数据统计分析。

实验结果

1 4-BDE处理下毛白杨组培苗的形态及显微结构变化

4-BDE处理的毛白杨组培苗(图1-E和图1-I)与对照苗(图1-A)相比,生长矮小,叶片颜色浅、叶面积小。

将4-BDE处理的毛白杨组培苗根、茎和叶片的显微结构与对照苗进行比较。对照苗的根表皮

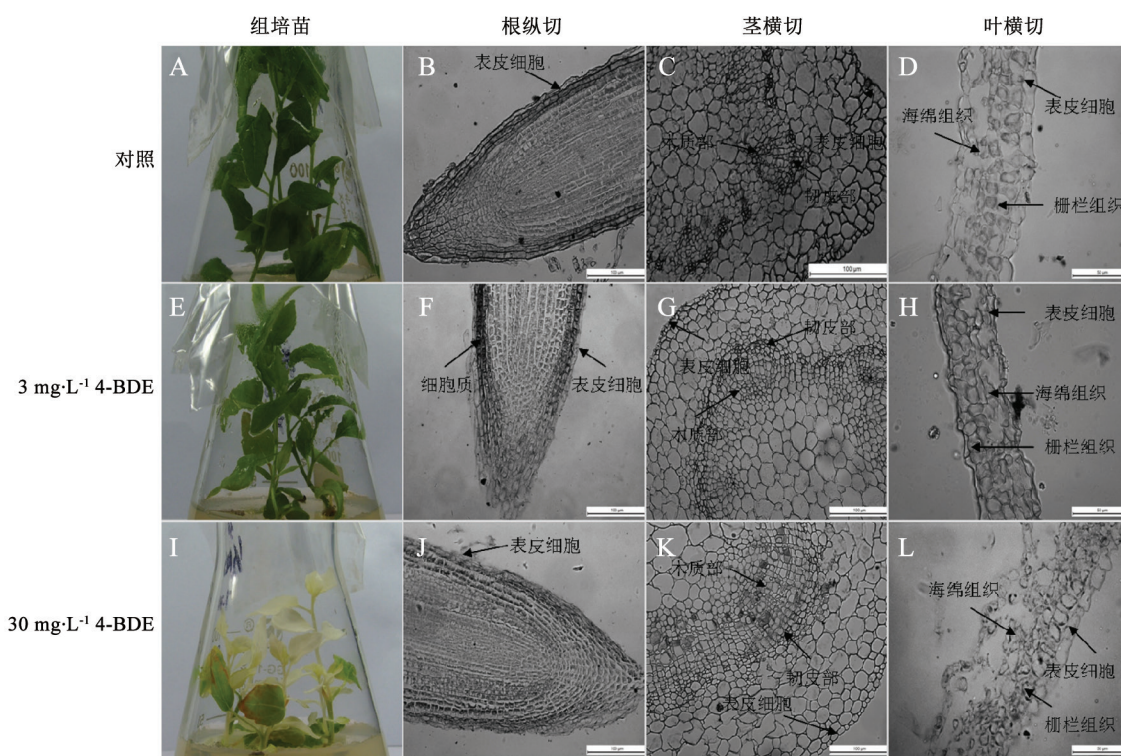


图1 不同4-BDE浓度处理下毛白杨组培苗形态及显微结构的差异

Fig.1 Differences in the morphology structure and microstructure in *P. tomentosa* seedlings under different concentrations of 4-BDE

A~D: 对照苗的植株、根纵切、茎横切和叶横切; E~H: 3 mg·L⁻¹ 4-BDE处理苗的植株、根纵切、茎横切和叶横切; I~L: 30 mg·L⁻¹ 4-BDE处理苗的植株、根纵切、茎横切和叶横切。右下角为比例尺, 根纵切和茎横切的比例尺为100 μm, 叶横切的比例尺为50 μm。

细胞完整, 且皮层细胞较大(图1-B)。3 mg·L⁻¹ 4-BDE处理的根表皮细胞完整, 且细胞质染色较深(图1-F)。而30 mg·L⁻¹ 4-BDE处理的根表皮细胞有损伤, 且细胞形态变小(图1-J)。4-BDE处理苗茎的显微结构(表皮细胞、木质部和韧皮部结构)与对照无显著差异(图1-C、G和K)。对照苗叶片的表皮细胞排列紧密, 栅栏组织细胞呈圆柱形, 海绵组织细胞呈长方形, 排列整齐(图1-D)。3 mg·L⁻¹ 4-BDE处理的细胞形态不规则, 栅栏组织比对照的紧密(图1-H)。30 mg·L⁻¹ 4-BDE处理的叶肉组织遭到破坏, 其中海绵组织破坏程度高于栅栏组织(图1-L)。

2 4-BDE处理对毛白杨组培苗生理指标的影响

2.1 4-BDE处理下毛白杨组培苗的叶片比叶重(LMA)变化

从图2可见, 对照和3 mg·L⁻¹ 4-BDE处理的LMA随时间延长呈先降低再升高的趋势, 而30 mg·L⁻¹ 4-BDE处理的LMA随时间延长呈升高趋

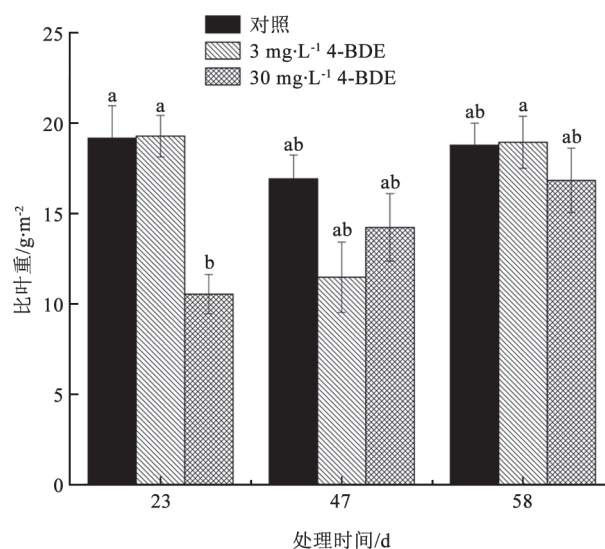


图2 不同浓度4-BDE处理下毛白杨组培苗叶片中LMA含量
Fig.2 The content of LMA in leaves of *P. tomentosa* seedlings under different concentrations of 4-BDE

小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。下图同此。

势。30 mg·L⁻¹ 4-BDE处理23 d的白化叶片LMA显著低于对照($P<0.05$), 其他处理与对照无显著差异。

2.2 4-BDE处理下毛白杨组培苗叶片色素含量变化

从图3可见, 低浓度3 mg·L⁻¹ 4-BDE处理23、47和58 d的叶片颜色比对照苗浅。高浓度30 mg·L⁻¹

4-BDE处理23 d的组培苗基部以上叶片为白化叶片; 47 d的组培苗叶片开始复绿, 叶片颜色为白绿相间; 58 d的组培苗叶片基本完全复绿, 叶片颜色比对照苗浅。组培苗叶片颜色变化现象与叶绿素含量变化有关。

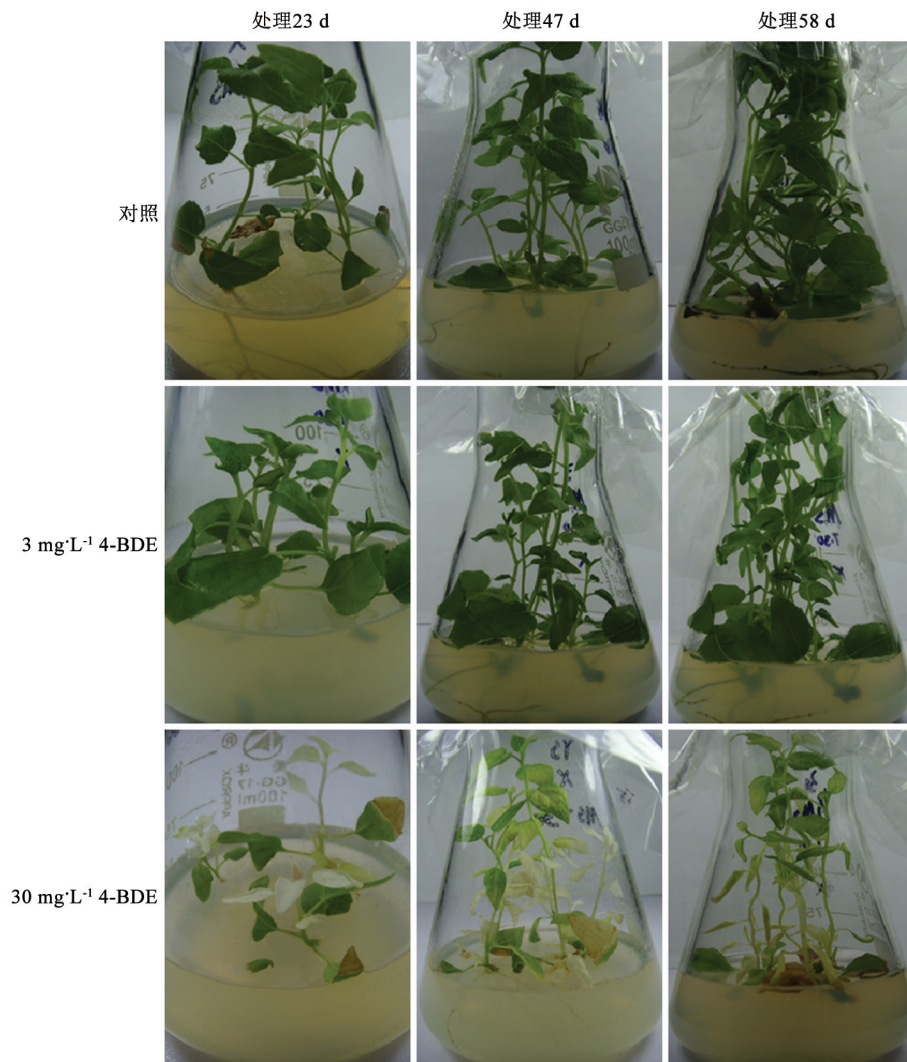


图3 不同4-BDE浓度处理的毛白杨组培苗叶片颜色的变化

Fig.3 Changes in the leaf color of *P. tomentosa* seedlings under different concentrations of 4-BDE

叶绿素a和叶绿素b分别是高等植物光合作用的主要色素和辅助色素, 其含量在一定程度上体现了光合作用的大小(陆志强2002)。表1发现, 毛白杨组培苗叶片中叶绿素a、叶绿素b和叶绿素(a+b)含量都随4-BDE浓度的升高而下降, 与4-BDE浓度存在明显的负相关性, 呈现出显著的浓度抑制效应。同一时间各处理与对照相比均达显著水

平($P<0.05$)。

2.3 4-BDE处理下毛白杨组培苗叶片MDA含量、POD活性和Pro含量的变化

对不同4-BDE浓度处理23、47和58 d的毛白杨组培苗叶片过氧化物酶(POD)活性、脯氨酸(Pro)和丙二醛(MDA)含量进行测定。从图4可见, 随处理时间延长, 对照的MDA含量先上升后下降, 3

表1 不同4-BDE浓度处理下毛白杨组培苗光合色素含量变化

Table 1 Changes of photosynthetic pigments contents in *P. tomentosa* seedlings under different concentrations of 4-BDE

4-BDE浓度/ mg·L ⁻¹	Chl a含量/mg·g ⁻¹ (FW)				Chl b含量/mg·g ⁻¹ (FW)			
	0 d	23 d	47 d	58 d	0 d	23 d	47 d	58 d
0 (对照)	1.31±0.09 ^c	2.31±0.26 ^b	2.57±0.02 ^a	2.43±0.21 ^a	0.42±0.04 ^c	0.66±0.13 ^a	0.61±0.05 ^a	0.75±0.07 ^a
3	1.31±0.09 ^c	1.27±0.17 ^c	2.20±0.04 ^c	1.32±0.06 ^c	0.42±0.04 ^c	0.33±0.06 ^d	0.56±0.04 ^b	0.44±0.02 ^c
30	1.31±0.09 ^c	0.02±0.02 ^e	0.10±0.01 ^e	0.86±0.14 ^d	0.42±0.04 ^c	0±0.01 ^e	0.01±0.01 ^e	0.28±0.04 ^d

4-BDE浓度/ mg·L ⁻¹	Chl (a+b)含量/mg·g ⁻¹ (FW)				Car含量/mg·g ⁻¹ (FW)			
	0 d	23 d	47 d	58 d	0 d	23 d	47 d	58 d
0 (对照)	1.73±0.12 ^c	2.96±0.38 ^{ab}	3.19±0.03 ^a	3.18±0.28 ^a	0.31±0.02 ^e	0.53±0.05 ^b	0.61±0.03 ^a	0.55±0.03 ^b
3	1.73±0.12 ^c	1.60±0.23 ^c	2.76±0.01 ^b	1.76±0.08 ^c	0.31±0.02 ^e	0.32±0.04 ^c	0.51±0.02 ^b	0.34±0.02 ^c
30	1.73±0.12 ^c	0.02±0.02 ^e	0.11±0 ^e	1.15±0.18 ^d	0.31±0.02 ^e	0.04±0.03 ^e	0.05±0.00 ^e	0.22±0.03 ^d

小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$); 表中数据为平均值±标准差。

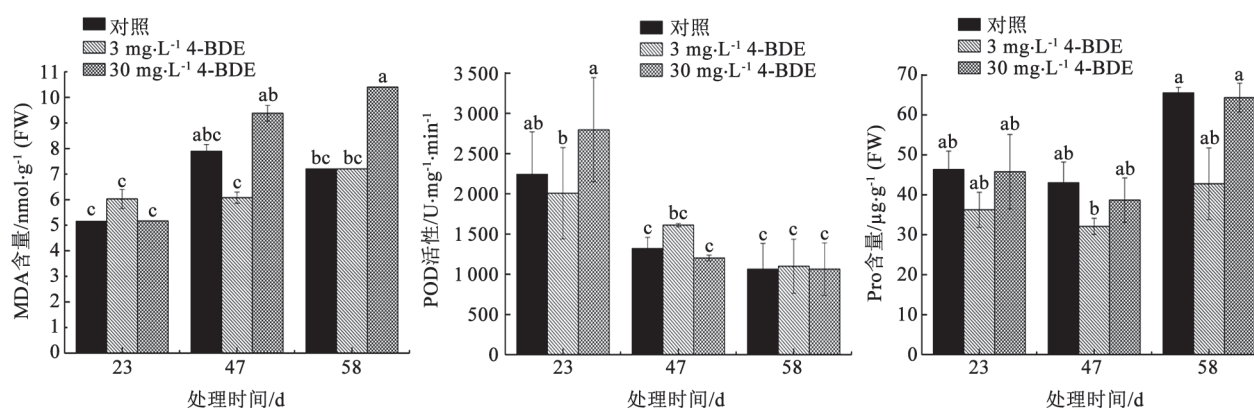


图4 不同4-BDE浓度处理下毛白杨组培苗叶片MDA含量、POD活性和Pro含量的变化

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

mg·L⁻¹ 4-BDE处理的MDA含量有所升高, 高浓度30 mg·L⁻¹ 4-BDE处理47和58 d的MDA含量显著高于处理23 d的MDA含量($P<0.05$), 分别相差1.81倍和2倍。

高浓度30 mg·L⁻¹ 4-BDE处理23 d的POD活性显著高于低浓度3 mg·L⁻¹处理。随时间延长, 4-BDE处理和对照的POD活性显著下降($P<0.05$); 相同时间的对照和处理POD活性之间无显著差异。

与对照相比, 相同时间的Pro含量略有下降, 低浓度3 mg·L⁻¹ 4-BDE处理的Pro含量低于高浓度30 mg·L⁻¹处理。随处理时间的增加, 处理和对照的Pro含量呈先降低再升高, 变化趋势不显著。

讨 论

本研究采用毛白杨组培苗作为污染物处理试

验体系, 克服了常规田间或盆栽研究中环境因素对试验结果的影响, 获得的结果重复性好、可比性强。

在本试验设定的4-BDE处理浓度范围内, 毛白杨组培苗叶片中叶绿素a、叶绿素b和叶绿素(a+b)含量都随4-BDE浓度的升高而下降, 与4-BDE处理浓度存在明显的负相关性, 呈现出显著的浓度抑制效应。与对照相比, 均达显著水平($P<0.05$)。通过对组培苗外观形态观察, 在低浓度4-BDE处理下, 组培苗叶片颜色变浅, 随着4-BDE处理浓度增加, 新叶出现失绿白化现象, 组培苗外部形态结果与对应时期色素变化规律一致。其叶绿素含量改变原因可能是4-BDE处理影响了毛白杨组培苗光合色素, 使叶绿素合成系统可能受损或受阻, 叶绿素合成减少, 或毛白杨组培苗叶片叶绿素降解加剧(Singh等1997; Gallego等1996; 孙塞

初等1985)。许多研究表明, 茈萸、菲和奈胁迫可引起植物叶片褪绿及叶绿素含量的下降(Ren等1994, 1996; 刘建武等2002), 本实验进一步验证了这一结论。

4-BDE处理对毛白杨组培苗干物质的累积均有不同程度的抑制作用。随4-BDE浓度的增加, 毛白杨组培苗LMA呈下降趋势。高浓度4-BDE处理23 d的白化叶片LMA显著低于对照和其他处理。这是因为, 白化叶片是受害的叶片, 高浓度4-BDE处理可能破坏了植物叶绿体结构, 阻碍了植物光合作用的正常进行, 光合碳同化的物质积累减少, 单位面积叶片的干物质含量减少, 最终影响植物的LMA(杨刚等2005)。

在低浓度4-BDE处理下, 毛白杨组培苗可通过自身调节机制来增强其对4-BDE处理的适应能力, 随4-BDE处理时间延长, Pro含量呈现先降低后增加趋势。在高浓度4-BDE处理下, 处理浓度超过毛白杨组培苗自身的耐受能力后, 毛白杨组培苗受到伤害、组培苗叶片出现白化受害状, 处理和对照中的POD活性显著降低。但随着高浓度4-BDE处理时间增加, 组培苗叶片受到伤害的程度加重(数据未发表), MDA含量显著增加。随着处理时间的延长, 叶片的色素含量回升并显著增加, 叶片出现复绿现象, 由此可以推测, 毛白杨组培苗对 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 4-BDE处理有一定的修复能力。

参考文献

- 蔡三山, 李晶, 王义勋, 陈京元(2013). 植物修复多氯联苯污染土壤的效果. 湖北农业科学, 52 (8): 1783~1785
- 郭杨, 王世和(2008). 多溴联苯醚的微生物降解研究. 中国沼气, 26 (4): 3~6
- 洪文宁(2004). 大气污染与城市绿化植物-兼谈城市生态绿化[学位论文]. 上海: 同济大学
- 刘泓, 叶媛蓓, 唐玲, 崔波(2008). 植物对PAHs胁迫响应及植物修复研究进展. 华侨大学学报(自然科学版), 29 (1): 1~5
- 刘家尧, 刘新(2010). 植物生理学实验教程. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 72~79
- 刘建武, 林逢凯, 王郁, 胥峥, 张啸(2002). 多环芳烃(蔡)污染对水生植物生理指标的影响. 华东理工大学学报: 自然科学版, 28 (10): 520~524
- 李和平(2009). 植物显微技术. 第2版. 北京: 科学出版社, 49
- 李和生(2000). 植物生理生化实验原理和技术. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 164~167
- 陆志强(2002). 多环芳烃对秋茄幼苗的生理生态效应及其在九龙江口红树林湿地的含量与分布[学位论文]. 厦门: 厦门大学
- 孙赛初, 王焕校, 李启任(1985). 水生微管植物受镉污染后的生理变化及受害机制初探. 植物生理学报, 11 (2): 113~121
- 杨刚, 伍钧, 唐亚(2005). 铅胁迫下植物抗性机制的研究进展. 生态学杂志, 24 (12): 1507~1512
- 郑威, 闫文德, 梁小翠, 朱凡(2011). 栎树幼苗对土壤中多环芳烃的富集及再分配. 中南林业科技大学学报, 31 (12): 70~74
- Carlsson G, Kulkarni P, Larsson P, Norrgren L (2007). Distribution of BDE-99 and effects on metamorphosis of BDE-99 and -47 after oral exposure in *Xenopus tropicalis*. Aquatic Toxicol, 84: 71~79
- Chen CY, Wang CK, Shih YH (2010). Microbial degradation of 4-monobrominated diphenyl ether in an aerobic sludge and the DGGE analysis of diversity. J Environ Sci Heal B, 45: 379~385
- Confalonieri M, Balestrazzi A, Bisoffi S, Carbonera D (2003). *In vitro* culture and genetic engineering of *Populus* spp.: synergy for forest tree improvement. Plant Cell Tiss Organ Cult, 72 (2): 109~138
- De Boer J, Wester PG, Horst AVD, Leonards PEG (2003). Polybrominated diphenyl ethers in influents, suspended particulate matter, sediments, sewage treatment plant and effluents and biota from the Netherlands. Environ Pollut, 122 (1): 63~74
- De Paolis MR, Pietrosanti L, Chlapotorti G, Massacci A, Lippi D (2011). *Salichlacciae* establishment in a heavy metal-contaminated site revealed by ecophysiological characterization of the culturable soil bacterial fraction. Water Air Soil Pollut, 216 (1-4): 505~512
- De Wit CA, Alae M, Muir DCG (2006). Levels and trends of brominated flame retardants in the Arctic. Chemosphere, 64 (2): 209~233
- Eriksson J, Green N, Marsh G, Bergman A (2004). Photochemical decomposition of 15 polybrominated diphenyl ether congeners in methanol/water. Environ Sci Technol, 38: 3119~3125
- Fang L, Huang J, Yu G, Wang LN (2008). Photochemical degradation of six polybrominated diphenyl ether congeners under ultraviolet irradiation in hexane. Chemosphere, 71: 258~267
- Gallego SM, Benzcidés MP, Tomaro ML (1996). Effect of heavy metal ion excess on sunflower leaves: evidence for involvement of oxidative stress. Plant Sci, 121: 151~159
- He P, He WH, Wang AG, Xia T, Xu BY, Zhang M, Chen XM (2008a). PBDE-47 induced oxidative stress, DNA damage and apoptosis in primary cultured rat hippocampal neurons. Neuro Toxicol, 29: 124~129
- He WH, He P, Wang AG, Xia T, Xu BY, Chen XM (2008b). Effects of PBDE-47 on cytotoxicity and genotoxicity in human neuroblastoma cells *in vitro*. Mutat Res, 649: 62~70
- Keum YS, Li QX (2005). Reductive debromination of polybrominated diphenyl ethers by zerovalent iron. Environ Sci Technol, 39 (7): 2280~2286
- Koch GW, Sillett SC, Jennings GM, Davis SD (2004). The limits to tree height. Nature, 428: 851~854
- Lonardo SD, Chlapuana M, Arnetoli M, Gabbriellini R, Gonnelli C (2011). Exploring the metal phytoremediation potential of three *Populus alba* L. clones using an *in vitro* screening. Environ Sci Pollut Res, 18 (1): 82~90
- MacDonald TA (2002). A perspective on the potential health risks of PBDEs. Chemosphere, 46: 745~755

- Martin M, Lam PKS, Richardson BJ (2004). An Asian quandary: where have all of the PBDEs gone? *Mar Pollut Bull*, 49 (5-6): 375~382
- Rayne S, Ikonou MG, Whale MD (2003). Anaerobic microbial and photochemical degradation of 4,4'-dibromodiphenyl ether. *Water Res*, 37 (3): 551~560
- Ren L, Huang XD, Mcconkey BJ, Dixon DG, Greenberg BM (1994). Photoinduced toxicity of three polycyclic aromatic hydrocarbons (fluoranthene, pyrene and naphthalene) to the duckweed *Lemna gibba* L. G-3. *Ecotoxicol Environ Saf*, 28 (2): 160~171
- Ren L, Zeiler LF, Dixon DG, Greenberg BM (1996). Photoinduced effects of polycyclic aromatic hydrocarbons on *Brassica napus* (Canola) during germination and early seedling development. *Ecotoxicol Environ Saf*, 33: 73~80
- Robrock KR, Korytár P, Alvarez-Cohen L (2008). Pathways for the anaerobic microbial debromination of polybrominated diphenylethers. *Environ Sci Technol*, 42 (8): 2845~2852
- Schmidt S, Fortnagel P, Wittich RM (1993). Biodegradation and Transformation of 4,4'-and 2, 4-Dihalodiphenyl Ethers by *Sphingomonas* sp. strain SS3. *Appl Environ Microb (AEM)*, 59 (11): 3931~3933
- Sellström U, Kierkegaard A, De Wit C, Jansson B (1998). Polybrominated diphenyl ethers and hexabromo-cyclododecane in sediment and fish from a Swedish river. *ET&C*, 17 (6): 1065~1072
- Shih YH, Chou HL, Peng YH (2012). Microbial degradation of 4-monobrominated diphenyl ether with anaerobic sludge. *J Hazard Mater*, 213-214: 341~346
- Singh RP, Tripathi RD, Sinha SK, Maheshwari R, Srivastava HS (1997). Response of higher plants to lead contaminated environment. *Chemosphere*, 34: 2467~2493
- Söderström G, Sellström U, De Wit CA, Tysklind M (2004). Photolytic debromination of dechl acromodiphenyl ether (BDE 209). *Environ Sci Technol*, 38: 127~132
- Takasuga T, Senthilkumar K, Takemori H, Ohi E, Tsuji H, Nagayama J (2004). Impact of fermented brown rice with *Aspergillus oryzae* (FEBRA) intake and concentrations of polybrominated diphenylethers (PBDEs) in blood of humans from Japan. *Chemosphere*, 57 (8): 795~811
- Tuskan GA, DiFazio S, Jansson S, Bohlmann J, Grigoriev I, Hellsten U, Putnam N, Ralph S, Rombauts S, Salamov A et al (2006). The genome of black cottonwood, *Populus trichocarpa* (Torr. Gray.). *Science*, 131 (5793): 1596~1604