

# 再力花对河涌底泥中多溴联苯醚的去除

杨雷峰<sup>1</sup>, 尹华<sup>2\*</sup>, 叶锦韶<sup>1</sup>, 彭辉<sup>3\*</sup>, 谢丹平<sup>4</sup>, 刘绍伟<sup>4</sup>

(1.暨南大学环境工程系,广东省高校水土环境毒害性污染防治与生物修复重点实验室,广州 510632; 2.华南理工大学环境与能源学院,工业聚集区污染控制与生态修复教育部重点实验室,广州 510006; 3.暨南大学化学系,广州 510632; 4.环境保护部华南环境科学研究所,广州 510656)

**摘要:** 选用河涌常见植物——再力花对河涌底泥中多溴联苯醚(PBDEs)进行原位生物修复研究,通过室内盆栽实验,考察了植物在修复过程中的作用、修复过程中多溴联苯醚种类和含量的变化以及底泥微生物活性对PBDEs去除的影响。结果表明,再力花可以有效提高底泥中十溴联苯醚(BDE-209)的去除率,历经390 d,空白组BDE-209含量由 $1.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降至 $1.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,处理组则降至 $0.97 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,去除率由15%提高到27%。使用GC-MS对BDE-209降解产物进行检测分析,结果表明再力花对底泥中BDE-209降解过程中会产生BDE-207、BDE-206等三溴-九溴联苯醚产物。对底泥中的微生物活性和去除率结果分析表明,植物的种植可以提高底泥中微生物的活性,进而提高BDE-209的去除率。

**关键词:** 多溴联苯醚;植物修复;脱溴;再力花

中图分类号:X52 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)01-0130-07 doi:10.11654/jaes.2015.01.019

## Removal of Polybrominated Diphenyl Ethers in River Sediments by *Thalia Dealbata*

YANG Lei-feng<sup>1</sup>, YIN Hua<sup>2\*</sup>, YE Jin-shao<sup>1</sup>, PENG Hui<sup>3\*</sup>, XIE Dan-ping<sup>4</sup>, LIU Shao-wei<sup>4</sup>

(1.Department of Environmental Engineering, Key Laboratory of Water/Soil Toxic Pollutants Control and Bioremediation of Guangdong Higher Education Institutes, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2.Key Lab of Pollution Control and Ecosystem Restoration in Industry Clusters, College of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 3.Department of chemistry, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 4.South China Institute of Environment Sciences, Ministry of Environment Protection, Guangzhou 510656, China)

**Abstract:** *Thalia dealbata* is a fast-growing and quick-multiplying aquatic plant, and may be used to phytoremediate polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in river sediments. A pot experiment was conducted in a greenhouse to investigate the changes of type and concentration of PBDEs and the microbial activity in sediments under *Thalia dealbata*. *Thalia dealbata* significantly enhanced the removal rate of BDE-209 in the sediments. After 390 days, the concentration of BDE-209 in control and treatment reduced to  $1.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  and  $0.97 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  from  $1.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectively, with removal rate increased from 15% to 27%. GC-MS analysis suggested that degradation products of BDE-209 varied from tribromodiphenyl ethers to nonabromodiphenyl ethers such as BDE-207 and BDE-206. The relationship between microbial activity and removal efficiency of BDE-209 in sediments showed that planting *Thalia dealbata* enhanced microbial activity, and thus accelerated removal of BDE-209. The residual BDE-209 was negatively correlated with microbial activity characterized by FDA.

**Keywords:** polybrominated diphenyl ethers; phytoremediation; debromination; *Thalia dealbata*

收稿日期:2014-08-14

基金项目:国家自然科学基金委-广东省联合基金重点项目(U0933002);广东省自然科学基金重点项目(S2013020012808);中央高校基本科研业务费专项基金(2013ZM0126);教育部产学研结合项目(2012B091000055);广州市环保局科技计划项目(穗财建(2012)399号);番禺区科技局科技计划项目(2010-专-12-06)

作者简介:杨雷峰(1988—),男,硕士研究生,主要研究方向为水污染控制与修复。E-mail:475451674@qq.com

\*通信作者:尹华 E-mail:huayin@scut.edu.cn;彭辉 E-mail:tpenghui@163.com

多溴联苯醚(PBDEs)作为一种价廉的溴代阻燃添加剂,被广泛应用于塑料、纺织品、电路板等产品的防火材料中。由于PBDEs只是通过物理方式添加到高分子聚合物之中,在产品生产、使用和处置过程中,PBDEs极易释放到环境中而对其造成污染,危害人体健康<sup>[1-3]</sup>。PBDEs的分布已经遍及世界各个角落,Muir等甚至在北极熊体内检测到了PBDEs的存在<sup>[4-6]</sup>。商品PBDEs主要包括五溴联苯醚、八溴联苯醚和十溴联苯醚(BDE-209),其中BDE-209应用最多。Annao等在研究中国PBDEs的空间分布时,发现不同土壤样品中BDE-209占据了PBDEs总量的很大比重,而在分析河岸土壤中的PBDEs含量时,发现在总量高达63 300 ng·g<sup>-1</sup>的PBDEs样品中,BDE-209的含量达48 600 ng·g<sup>-1</sup>,表明我国使用的溴代阻燃剂主要是BDE-209<sup>[7]</sup>。目前,对于环境中BDE-209的处理主要有物理法、化学法和生物法<sup>[8]</sup>,而植物修复法因其成本低、应用范围广等特点已逐渐成为人们研究的热点<sup>[8-9]</sup>。Huang等发现,植物的种植能够提高微生物对土壤中PBDEs的降解率<sup>[10]</sup>,但现有研究主要集中在不同植物对土壤中BDE-209降解的影响,对于河涌底泥中植物原位修复条件下该污染物随时间的变化以及污染物的转化情况报道较少。河涌底泥中PBDEs因与底泥作用时间长,与底泥颗粒物表面吸附紧密,所以其生物有效性很低<sup>[11-12]</sup>。本实验选用受BDE-209污染的河涌底泥作为基质,以河涌边常见的、具有较大生物量和顽强生命力的挺水植物再力花作为修复植物,探讨了随时间推移底泥和植物中BDE-209含量的变化及转化情况,以期为河涌底泥中PBDEs污染的原位修复提供理论依据和实验基础。

## 1 材料和方法

### 1.1 供试材料

植物:再力花,购自广州市花卉市场。

基质:底泥采自广州市莲花镇珠江,其基本理化性质如下:TN(0.22±0.02)%,TP(0.45±0.5)%,速效钾(1950±100)mg·kg<sup>-1</sup>,pH 7.6±0.2。底泥中PBDEs:三溴~九溴联苯醚含量分别为4.97、9.9、10.03、7.54、48.3、15.88、36.31 μg·kg<sup>-1</sup>,BDE-209含量为1330 μg·kg<sup>-1</sup>。

试剂:有机溶剂,包括正己烷、二氯甲烷、丙酮等均为色谱纯,实验用水为自来水。PBDEs混标及内标物购自百灵威科技有限公司,其组分以及GC-MS上机扫描特征离子如表1所示。

### 1.2 实验设计

分别取适量等量底泥置于49个花盆中至其二分之一处,上覆自来水,选出长势均匀一致的35株再力花幼苗移植到上述35个花盆中,分成7组,每组添加两个没有种植植物的空白。采样周期为两个月,采样方法为用剪刀剪掉地上部分,小心拔出地下部分,带出的底泥算作根际底泥,用手挤压掉其上根际泥土,分别装入自封袋中。植株先于自来水中冲洗,后用去离子水冲洗,全部放于冰箱冷冻过夜后经冷冻干燥72 h,再将植株样品粉碎过20目筛,底泥样品去除较大颗粒物后经玛瑙研钵研磨过60目筛,避光保存在-70℃超低温冰箱。

### 1.3 萃取方法

称取5 g底泥样品、1 g植物样品于30 mL玻璃离心管中,分别加入20 μL 0.5 mg·L<sup>-1</sup>回收率指示物

表1 PBDEs混标、回收率指示物和内标物成分及定量离子

Table 1 PBDE standard mixtures, recovery indicators, and internal standards and their fragment ions

种类	英文缩写	定量离子( <i>m/z</i> )	种类	英文缩写	定量离子( <i>m/z</i> )
三溴联苯醚	BDE-17	81 161	七溴联苯醚	BDE-190	81 161
三溴联苯醚	BDE-28	81 161	八溴联苯醚	BDE-197	81 408
四溴联苯醚	BDE-71	81 161	八溴联苯醚	BDE-203	81 563
四溴联苯醚	BDE-47	81 161	八溴联苯醚	BDE-196	81 799
四溴联苯醚	BDE-66	81 161	九溴联苯醚	BDE-208	81 488
五溴联苯醚	BDE-100	81 161	九溴联苯醚	BDE-207	81 486
五溴联苯醚	BDE-90	81 161	九溴联苯醚	BDE-206	81 486
六溴联苯醚	BDE-154	81 161	十溴联苯醚	BDE-209	81 488
六溴联苯醚	BDE-153	81 161	回收率指示物	PCB-209	497 501
六溴联苯醚	BDE-138	81 161	回收率指示物	<sup>13</sup> C-PCB-141	371 373
七溴联苯醚	BDE-183	81 161	内标物	<sup>13</sup> C-PCB-208	475 481

$^{13}\text{C}$  标记六氯联苯醚 ( $^{13}\text{C}$ -PCB-141) 和十氯联苯醚 (PCB-209), 底泥样品再加入 1 g 铜粉用以去除硫, 加入 25 mL 正己烷/丙酮 ( $V/V=1:1$ ) 于离心管, 150 W、40 Hz 条件下超声萃取 30 min, 离心 10 min 后取上清液于鸡心瓶, 重复 3 次; 用冰袋控制超声仪器的水温不高于 30  $^{\circ}\text{C}$ , 旋转蒸干后加入 5 mL 正己烷/二氯甲烷 ( $V/V=1:1$ ) 转移到硅胶氧化铝层析柱中, 自下而上为 6 cm 中性氧化铝、2 cm 中性硅胶、5 cm 碱性硅胶、2 cm 中性硅胶、8 cm 酸性硅胶和 1 cm 无水硫酸钠。之后分别用 20、20、5 mL 正己烷/二氯甲烷 ( $V/V=1:1$ ) 分 3 次洗涤鸡心瓶并转移到层析柱中洗脱, 收集洗脱液旋干后准确定容到 1 mL, 转移到上机瓶中, 加入 20  $\mu\text{L}$   $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的  $^{13}\text{C}$  标记九氯联苯醚 ( $^{13}\text{C}$ -PCB-208) 作为内标物, 待测。

#### 1.4 质量控制与保证

对底泥和植物样品中的 BDE-209 进行萃取时采用基质加标和内标物定量进行质量控制与质量保证, 基质加标试验设置 3 个平行, 同时设置 3 个空白平行样。处理后上机检测计算回收率时扣除空白平行样的含量, 基质加标回收率平均值为 82.62%~105.19%, RSD 为 6.42%~10.25%, 回收率指示物  $^{13}\text{C}$ -PCB-141 和 PCB-209 的加标回收率为 70%~120%, 达到分析测试准确度要求。分析样品设置 3 个平行, 在每批样品进行仪器分析前, 用空白溶剂和已知浓度标样检查仪器的灵敏度和稳定性, 同一标样测定的误差小于 20% 方可进行样品测定, 否则对仪器进

行调试。

#### 1.5 荧光素二乙酸酯 (FDA) 微生物总活性测定方法

称取 5 g 左右湿沉积物样, 加入灭菌的 0.85% NaCl 溶液 20 mL, 于 30  $^{\circ}\text{C}$ 、200  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  摇床中分散 15 min 后加入  $2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  的 FDA 液 2.5 mL, 于 30  $^{\circ}\text{C}$  摇床 150  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  中显色 3 h, 加入 1 mL 丙酮终止反应, 5000  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  离心、慢速滤纸过滤, 于 490 nm 波长处比色, 测定吸光度, 换算成单位质量干泥的吸光度值, 以此表示沉积物中微生物 FDA 活性<sup>[13-14]</sup>。

#### 1.6 PBDEs 的 GC-MS 检测条件

色谱柱条件: 毛细管柱 (DB-5MS, 15 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.1  $\mu\text{m}$ ), 载气为 He。质谱条件: 离子源为 NCI 源, 温度 150  $^{\circ}\text{C}$ , 反应气为  $\text{CH}_4$ 。分析条件: 进样口温度 280  $^{\circ}\text{C}$ , 升温程序为 110  $^{\circ}\text{C}$  保持 5 min, 再以 10  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  升至 310  $^{\circ}\text{C}$ , 保持 10 min。数据采集先采用 SCAN 模式 ( $m/z=50\sim 1000$ ), 后采用 SIM 模式, 出峰时间如图 1 所示<sup>[15]</sup>。

#### 1.7 数据分析

文中数据为 3 组平行样的平均值, 采用 Excel 数据处理软件 (版本为 2003) 及 Origin 统计软件 (版本为 8.0) 进行数据整理、统计分析和绘图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 样品中 BDE-209 含量的变化

通过测定发现底泥背景值以及处理组样品中 BDE-209 含量占 84% 以上 (表 2)。随着时间的延长,

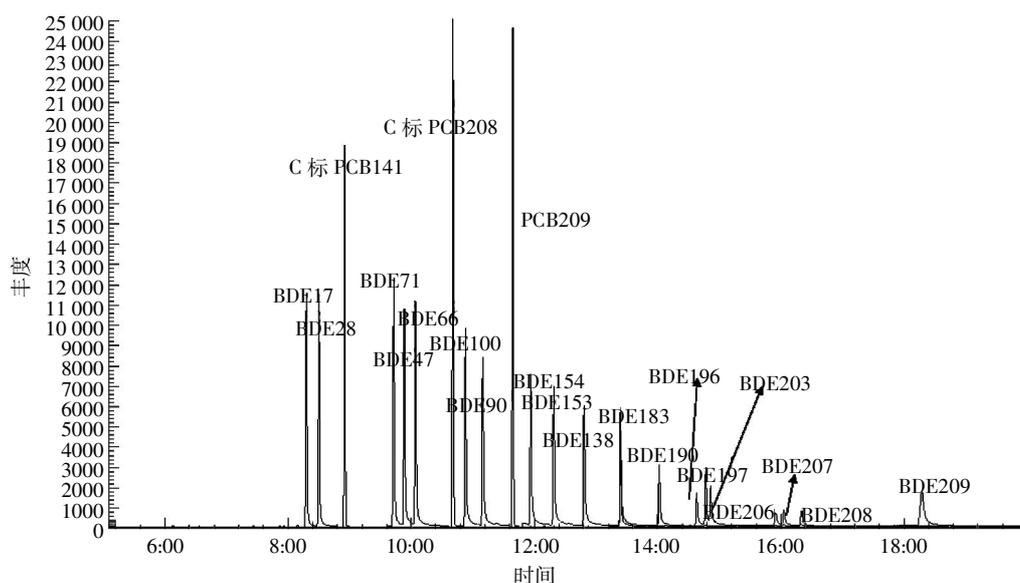


图 1 PBDEs 标样 GC-MS 进样色谱图

Figure 1 GC-MS chromatograms of PBDE standards

其含量总的变化趋势是逐渐减少(图2)。历经390 d, 对照组 BDE-209 去除率为 15%, 而试验组去除率则达到了 27%, 说明植物的种植可以促进 BDE-209 的去除。与前人所做关于植物对 BDE-209 去除的研究相比, 本实验结果稍微偏低, 原因可能是不同植物对 BDE-209 的去除效果不同, 更重要的是本试验是以环境中受 BDE-209 污染的实际底泥为基质, 这部分 BDE-209 的生物有效性更低, 更难以去除。植物可以吸收部分 BDE-209<sup>[10]</sup>, 在其体内酶的作用下再将污染物转化脱溴, Huang 等研究表明根系酶的提取物硝酸还原酶和谷胱甘肽转化酶可以降解 PBDEs<sup>[10, 17-18]</sup>。另外, 根系可以向底泥中分泌有机酸、糖类、酚类等有机物质, 这些物质可以改善底泥理化性状, 提高微生物数量和活性, 增加 BDE-209 的生物有效性, 从而提高 BDE-209 的降解率<sup>[2]</sup>。而微生物对 BDE-209 的降解在污染物去除过程中起到主要的作用<sup>[10]</sup>, Gerecke 将加有 BDE-209 的污泥在厌氧条件下保存 238 d, 发现降解率达到了 30%<sup>[19]</sup>; 江虹等证实 J 菌在优化条件下也可以对 BDE-209 具有很高的降解率<sup>[10, 20]</sup>。

图 2 还显示在植株的地下部分和地上部分均检

表 2 样品中 BDE-209 所占 PBDEs 总量百分比

Table 2 Percentages of BDE-209 in total PBDEs in samples

采样时间/d	CK 底泥中 BDE-209 所占比例/%	根际底泥中 BDE-209 所占比例/%	植株根部 BDE-209 所占比例/%	植株地上部 BDE-209 所占比例/%
30	90	92	95	95
90	89	90	93	95
150	90	87	95	94
210	91	87	93	96
270	84	90	95	95
330	92	88	95	95
390	91	91	96	95

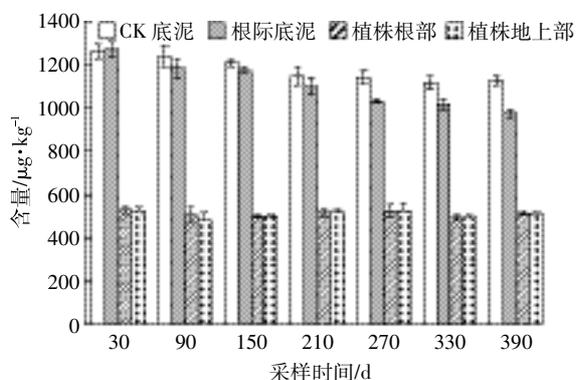


图 2 样品中 BDE-209 含量随时间变化

Figure 2 Changes of BDE-209 in samples over time

测到 BDE-209 的存在, 说明植株可以吸收储存一定量的 BDE-209。随着时间的推移其地上和地下部分含量变化较小, 且两部分基本无差异, 因为该植物并不是一种 BDE-209 的超富集植物, 它对 BDE-209 的吸收是有限的。此外, 也有可能是植物地下部分从底泥吸收的 BDE-209, 一部分被转化掉, 另一部分转移到地上部分, 两者之间保持着动态平衡<sup>[21-22]</sup>。

## 2.2 底泥中 BDE-209 残余量与微生物活性关系

荧光素二乙酸酯(FDA)水解酶活性作为一种快速灵敏的测定环境样品微生物活性的方法, 与微生物活性间的相关性比其他酶活性更显著, 该方法已经广泛用于表征不同环境中, 特别是土壤环境中的微生物生物量和总微生物活性。底泥中 BDE-209 残余量和微生物活性之间的关系如图 3 所示。底泥中的 FDA 值明显高于空白组, 随着时间的变化, 处理组底泥中 BDE-209 的残余量逐渐降低并始终低于空白组 BDE-209 的残余量。其原因则可能是, 植物会向底泥释放出一系列的根系分泌物, 它们一方面提高了底泥中微生物数量和活性, 另一方面提高了 BDE-209 的生物有效性<sup>[23-26]</sup>, 微生物代谢活动旺盛, BDE-209 随着微生物生命活动的进行而被去除。Huang 等研究了不同植物根际代表微生物数量和活性的磷脂脂肪酸(Total PLFAs)值的变化, 结果表明土壤里 BDE-209 的残余量和 Total PLFAs 值呈负相关关系<sup>[10]</sup>, 与本研究有相似之处。

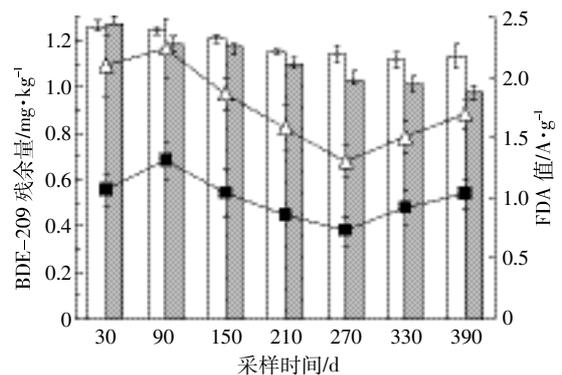


图 3 底泥中 BDE-209 残余量和 FDA 值的关系

Figure 3 Correlation between BDE-209 residual concentration and FDA in sediments

## 2.3 样品中 BDE-209 降解产物分析

### 2.3.1 根际底泥中 BDE-209 的降解途径

在根际底泥样品中, 检测到的 PBDEs 种类有九溴联苯醚(Nona-BDEs)、八溴联苯醚(Octa-BDEs)、七

溴联苯醚(Hepta-BDEs)、六溴联苯醚(Hex-BDEs)、五溴联苯醚(Penta-BDEs)、四溴联苯醚(Tetra-BDEs)及三溴联苯醚(Tri-BDEs)共18种(种类如表1所示),含量分别为21~50、14~25、14~22、7~12、5~14、7~13  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和4~5  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图4),底泥样品中这七类PBDEs各自在PBDEs总含量中所占比例(8%~13%)大于植株样品中对应种类所占比例(4%~7%),如图4、5、6所示。可以推测,在底泥中BDE-209的脱溴速率大于植株样品中BDE-209的降解速率,而九溴、八溴、七溴联苯醚所占比例为18种PBDEs总含量的70%以上,随着Br原子数量的减少,六溴联苯醚及以下的PBDEs含量越来越少,而且所占比例随时间变化很小,原因可能是九溴、八溴、七溴联苯醚等继续脱溴的难度变大;另外,三溴联苯醚等低溴代PBDEs更易于被微生物所去除。随着时间的推移,PBDEs各成分含量以及组成比例有所变化,可以推断在底泥中BDE-209有脱溴行为的发生<sup>[10]</sup>。底泥环境中存在着好氧、厌氧微生物,它们在BDE-209降解过程中起到了关键的作用。好氧条件下主要降解途径是BDE-209的2,3碳键在被2,3双加氧酶攻击后衍生形成2,3-二羟基溴代联苯醚,然后邻位或间位开环裂解<sup>[27]</sup>。在研究好氧菌短芽孢杆菌对BDE-209去除特性时,经过5d时间检测出BDE-209降解产物为3种九溴联苯醚(BDE-208、BDE-207和BDE-206),3种八溴联苯醚(BDE-203、BDE-19和BDE-196)以及1种七溴联苯醚(BDE-183)。该研究与本实验结果有相似之处。BDE-209的厌氧微生物的降解周期较长,主要是通过还原脱溴使高溴代联苯醚逐步降解为低溴代联苯醚<sup>[28]</sup>。

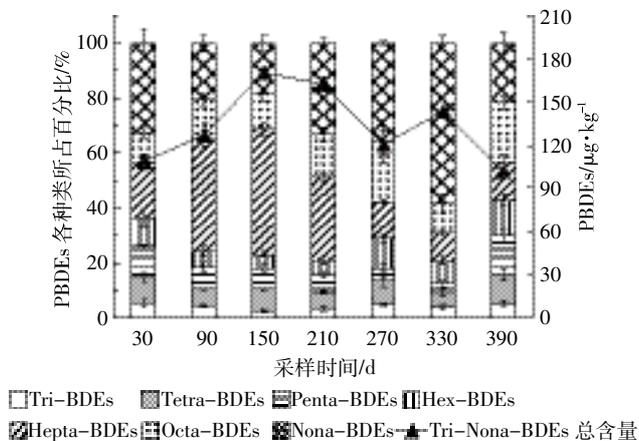


图4 根际底泥中PBDEs含量及其各种类所占比例的变化  
Figure 4 Changes of concentrations and proportions of PBDEs in sediments over time

### 2.3.2 植物中BDE-209的降解途径

在植物样品根部(Roots)和地上嫩枝部分(Shoots),检测到了三溴-十溴联苯醚,如图2、5、6所示,说明再力花根系可以从底泥中吸收BDE-209并向地上部分运输,根部PBDEs含量并不随着底泥中PBDEs含量的变化发生较大波动,说明植物根部具有较强的向地上部分运输PBDEs的能力<sup>[17]</sup>。植物样品中九溴、八溴、七溴联苯醚占主要组成部分,含量分别为5~10、4~9、3~4  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,表明PBDEs在植物中可以被降解<sup>[10]</sup>。而三溴、四溴、五溴、六溴联苯醚的浓度仅为2~5  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,且其所占比例随时间变化很小,原因则可能是九溴、八溴、七溴等高溴代联苯醚的继续脱溴难度较大,同时植物对于溴原子较少的PBDEs(如三溴联苯醚等)具有较高的去除效果。另外,不同种类PBDEs的辛醇水分配系数 $K_{ow}$ 不同,其被植物吸收的难

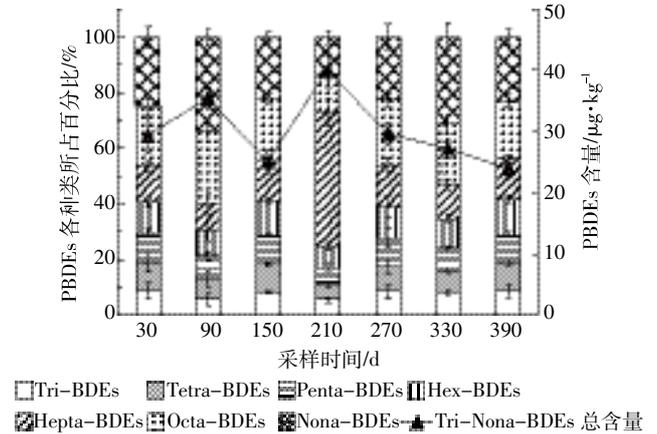


图5 植株根部PBDEs含量及其各种类所占比例的变化  
Figure 5 Changes of concentration and proportions of PBDEs in roots over time

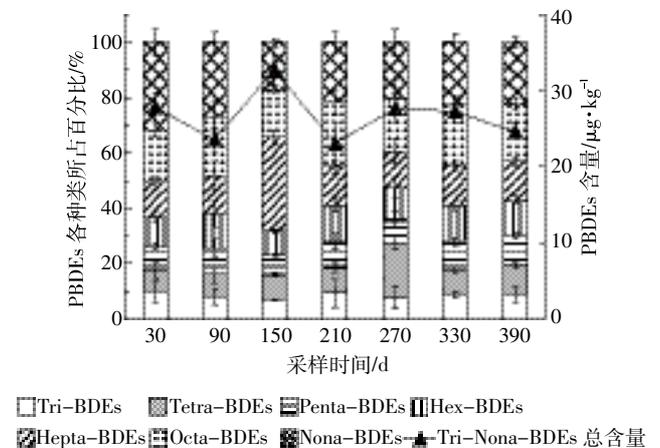


图6 植株地上部PBDEs含量及其各种类所占比例的变化  
Figure 6 Changes of concentrations and proportions of PBDEs in shoots over time

易程度也不相同,在本试验中,植物中的PBDEs有一部分是从底泥中吸收的,还有一部分是植物降解PBDEs的产物,很难将两部分区分开来。因此,PBDEs在植物中被去除、转化的详细机理还需要更深入的探究。

### 3 结论

样品中BDE-209的含量占84%以上,说明该河涌底泥PBDEs污染以BDE-209污染为主。实验发现:植物再力花的种植可以提高底泥中微生物的活性,促进BDE-209的去除;再力花可以从底泥中吸收BDE-209并向地上部分运输;植物的种植提高了底泥中微生物的活性,有利于BDE-209的去除。在底泥中和植物体内有BDE-209脱溴行为的发生。

#### 参考文献:

- [1] De Wit C A. An overview of brominated flame retardants in the environment[J]. *Chemosphere*, 2002, 46(5):583-624.
- [2] Birnbaum L S, Staskal D F. Brominated flame retardants: Cause for concern?[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2004, 112(1):9-17.
- [3] Wang Y, Luo C, Li J, et al. Characterization of PBDEs in soils and vegetations near an e-waste recycling site in South China[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(10):2443-2448.
- [4] 郭雅涛, 吴后波, 王广华, 等. 微生物降解多溴联苯醚研究进展[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(3):198-204.  
GUO Ya-tao, WU Hou-bo, WANG Guang-hua, et al. Progress on biodegradation of polybrominated diphenyl ethers by microorganisms[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 35(3):198-204.
- [5] Muir D C G, Backus S, Derocher 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.
- [6] 陈社军, 麦碧娴, 曾永平, 等. 珠江三角洲及南海北部海域表层沉积物中多溴联苯醚的分布特征[J]. 环境科学学报, 2005, 25(9):1265-1271.  
CHEN She-jun, MAI Bi-xian, ZENG Yong-ping, et al. Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in surficial sediments of the pearl river delta and adjacent China sea[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(9):1265-1271.
- [7] Leung A O W, Luksemburg W J, Wong A S, et al. Spatial distribution of polybrominated diphenyl ethers and polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in soil and combusted residue at Guiyu, an electronic waste recycling site in Southeast China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(8):2730-2737.
- [8] Michael L, Rachel P, Lynn W. Fate of pesticides in the environment[J]. *Environment Pollution*, 2011, 159(10):2328-2346.
- [9] Singh O V, Jain R K. Phytoremediation of toxic aromatic pollutants from soil[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2003, 63(2):128-135.
- [10] Huang H, Zhang S, Christie P, et al. Behavior of decabromodiphenyl ether (BDE-209) in the soil-plant system: Uptake, translocation, and metabolism in plants and dissipation in soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(2):663-667.
- [11] Lunney A I, Zeeb B A, Reimer K J. Uptake of weathered DDT in vascular plants: Potential for phytoremediation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(22):6147-6154.
- [12] Eljarrat E, De la cal A, Raldua D, et al. Occurrence and bioavailability of polybrominated diphenyl ethers and hexabromocyclododecane in sediment and fish from the Cinca River, a tributary of the Ebro River (Spain)[J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(9):2603-2608.
- [13] 王智焯, 徐茜, 钱海丰. FDA水解检测井冈霉素的土壤微生物活性效应[J]. 土壤通报, 2007, 38(5):1030-1032.  
WANG Zhi-ye, XU Xi, QIAN Hai-feng, et al. Effect of jinggangmycin on microbial activities in soil by FDA hydrolysis[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(5):1030-1032.
- [14] 刘海芳, 马军辉, 金辽, 等. 水稻土FDA水解酶活性的测定方法及应用[J]. 土壤学报, 2009, 46(2):365-367.  
LIU Hai-fang, MA Jun-hui, JIN Liao, et al. Determination of activity of FDA hydrolysis in paddy soils and its application in Taihu Lake region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(2):365-367.
- [15] 王芳芳, 尹华, 龙焰, 等. 鼠李糖脂对苏云金芽孢杆菌J1降解/吸附水体中BDE-209/Pb的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(1):417-423.  
WANG Fang-fang, YIN Hua, LONG Yan, et al. Effect and mechanism of rhamnolipid on *Bacillus thuringiensis* J-1 degrading/adsorbing BDE-209/Pb in water body[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(1):417-423.
- [16] 吕俊, 尹华, 叶锦韶, 等. 杂交狼尾草对土壤锌/十溴联苯醚复合污染的生理响应及修复[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(12):2369-2376.  
LÜ Jun, YIN Hua, YE Jin-shao, et al. Physiological responses and phytoremediation effects of *Pennisetum americanum* on Zn/BDE-209 co-contaminated soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(12):2369-2376.
- [17] Mueller K E, Mueller-Spitz S R, Henry H F, et al. Fate of pentabrominated diphenyl ethers in soil: Abiotic sorption, plant uptake, and the impact of interspecific plant interactions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(21):6662-6667.
- [18] Huang H, Zhang S, Wang S, et al. In vitro biotransformation of PBDEs by root crude enzyme extracts: Potential role of nitrate reductase (NaR) and glutathione S-transferase (GST) in their debromination[J]. *Chemosphere*, 2013, 90(6):1885-1892.
- [19] Gerecke A C, Hartmann P C, Heeb N V, et al. Anaerobic degradation of decabromodiphenyl ether[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(4):1078-1083.
- [20] 江虹, 尹华, 彭辉, 等. BDE209好氧降解菌的筛选及降解特性研究[J]. 安全与环境学报, 2010(2):49-53.  
JIANG Hong, YIN Hua, PENG Hui, et al. Way to isolate a BDE209

- aerobic bio-degrading strain and its degradation properties[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2010(2):49-53.
- [21] 刘京, 尹华, 彭辉, 等. 狼尾草等6种植物对十溴联苯醚污染土壤的生理响应及其修复效果[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(9):1745-1751.
- LIU Jing, YIN Hua, PENG Hui, et al. Research on the physiological responses of six plants *Pennisetum alopecuroides* etc to BDE-209 in soil and their phytoremediation effect[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(9):1745-1751.
- [22] Vrkoslavová J, Demnerová K, Macková M, et al. Absorption and translocation of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) by plants from contaminated sewage sludge[J]. *Chemosphere*, 2010, 81(3):381-386.
- [23] 刘贝贝, 陈歆, 陈森, 等. 根系分泌物在土壤有机污染物降解中的作用[J]. *热带农业科学*, 2013, 33(10):47-52.
- LIU Bei-bei, CHEN Xin, CHEN Miao, et al. Role of root exudates in the degradation of organic pollutants in soils[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2013, 33(10):47-52.
- [24] 李娇, 蒋先敏, 尹华军, 等. 不同林龄云杉人工林的根系分泌物与土壤微生物[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(2):325-332.
- LI Jiao, JIANG Xian-min, YIN Hua-jun, et al. Root exudates and soil microbes in three pice asperata plantations with different stand ages[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(2):325-332.
- [25] Soleimani M, Afyuni M, Hajabbasi M A, et al. Phytoremediation of an aged petroleum contaminated soil using endophyte infected and non-infected grasses[J]. *Chemosphere*, 2010, 81(9):1084-1090.
- [26] Fan S, Li P, Gong Z, et al. Promotion of pyrene degradation in rhizosphere of alfalfa (*Medicago sativa* L.) [J]. *Chemosphere*, 2008, 71(8):1593-1598.
- [27] Rayne S, Wan P, Ikonou M, et al. Photochemistry of major commercial polybrominated diphenyl ether flame retardant congener; 2, 2', 4, 4', 5, 5'-Hexabromodiphenyl ether (BDE153)[J]. *Environment International*, 2006, 32:575-585.
- [28] Tokarz Iii J A, Ahn M Y, Leng J, et al. Reductive debromination of polybrominated diphenyl ethers in anaerobic sediment and a biomimetic system[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(4):1157-1164.