ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第5期

Vol.33 No.5

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

中国期刊方阵 双奖期刊 中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第33卷 第5期
2012年5月15日

目 次

区域空气质量模拟中查表法的应用研究 …… 谢旻,王体健,江飞,李树,蔡彦枫,庄炳亮(1409)
长江三角洲地区秸秆露天焚烧大气污染物排放清单及其在空气质量模式中的应用 …… 苏继峰,朱彬,康汉青,王红磊,王体健(1418)
北京及周边城市一元脂肪酸大气颗粒物干沉降通量及来源分析研究 …… 徐小娟,李杏茹,王跃思,刘晨书,潘月鹏,王英锋(1425)
上海大气超细颗粒物和工业纳米颗粒的表征及细胞毒性的比较研究 …… 张睿,吕森林,尚羽,易飞,任晶晶,郝晓洁,安静,吴明红(1431)
青岛市大气 $PM_{2.5}$ 元素组成及来源研究 …… 李秀镇,盛立芳,徐华,屈文军(1438)
冬季天津家庭室内空气颗粒物中邻苯二甲酸酯污染研究 …… 王夫美,陈丽,焦姣,张雷波,姬亚芹,白志鹏,张利文,孙增荣,张星梅(1446)
再悬浮装置在大气 $PM_{2.5}$ 源谱分析中的应用 …… 段恒轶,钱冉冉,吴水平,印红玲(1452)
黔西南煤燃烧产物微量元素分布特征及富集规律研究 …… 魏晓飞,张国平,李玲,项萌,蔡永兵(1457)
三峡水库不同运行状态下支流澎溪河水-气界面温室气体通量特征初探 …… 蒋滔,郭劲松,李哲,方芳,白镭,刘静(1463)
香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析 …… 王亮,肖尚斌,刘德富,陈文重,王雨春,陈小燕,段玉杰(1471)
臭氧浓度升高与土壤湿度对农田土壤微生物呼吸温度敏感性的影响 …… 陈书涛,张勇,胡正华,史艳姝,沈小帅(1476)
托木尔峰青冰滩72号冰川径流水化学特征初步研究 …… 赵爱芳,张明军,李忠勤,王飞腾,王圣杰(1484)
五大连池水溶性有机磷矿化特性的研究 …… 张斌,席北斗,赵越,魏自民,白雪,王曼林(1491)
7条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律 …… 卢少勇,远野,金相灿,焦伟,吴瑶洁,任德有,周羽化,陈雷(1497)
巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性 …… 李如忠,李峰,周爱佳,童芳,钱家忠(1503)
北运河系地表水近10年来水质变化及影响因素分析 …… 郭婧,荆红卫,李金香,李令军(1511)
东莞运河排涝对东江河网水质影响分析 …… 孙磊,毛献忠,黄旻旻(1519)
北京平原区地下水污染源识别与危害性分级 …… 陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮(1526)
地下水曝气修复过程的三维数值模拟 …… 李恒震,胡黎明,王建,武晓峰,刘培斌(1532)
垂向水动力扰动机的蓝藻控制效应数值实验研究 …… 邹锐,周璟,孙永健,嵇晓燕,岳佳,刘永(1540)
新型生物岛栅中污染物去除的微生物机制研究 …… 高明瑜,谢慧君,王文兴(1550)
营养盐水平对念珠藻胞外有机物产生的影响 …… 齐飞,刘晓媛,徐冰冰,黄岳,封莉,张立秋(1556)
水网藻种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究 …… 傅海燕,柴天,赵坤,刘智峰,张明真,侯明,许鹏成(1564)
酞酸酯在模拟海河菹草微宇宙中的消减和分布特征 …… 迟杰,杨青(1570)
电子束辐射对铜绿微囊藻藻毒素产生和释放的抑制作用研究 …… 刘书宇,吴明红,姜钦鹏(1575)
青铜峡灌区典型排水沟水污特征解析 …… 李强坤,胡亚伟,罗良国(1579)
四溴双酚A的辐照降解研究 …… 李杰,徐殿斗,徐刚,马玲玲,吴明红(1587)
污泥基活性炭催化臭氧氧化降解水中微量布洛芬的效能研究 …… 王红娟,齐飞,封莉,张立秋(1591)
高水力负荷对人工湿地处理精养虾塘排水效果的影响 …… 李怀正,章星异,陈卫兵,叶剑峰(1597)
城市污水生物脱氮系统出水经氯胺消毒形成NDMA的影响因素研究 …… 尚晓玲,李咏梅(1604)
利用淀粉基共混物作为反硝化固体碳源的研究 …… 沈志强,吴为中,杨春平,陈佳利,王建龙(1609)
好氧污泥颗粒化过程中Zeta电位与EPS的变化特性 …… 王浩宇,苏本生,黄丹,崔晓姣,竺建荣(1614)
活性污泥对病毒的生物吸附特性 …… 周玉芬,郑祥,雷洋,陈迪(1621)
阴离子型聚丙烯酰胺在离子交换膜上的吸附规律 …… 邓梦洁,于水利,时文歆,衣雪松(1625)
两性修饰膨润土对苯酚的吸附及热力学特征 …… 李婷,孟昭福,张斌(1632)
表面活性剂对苯并[a]芘在黑炭表面吸附解吸的影响 …… 张景环,陈春溶,张玮航,栗桂州(1639)
南京市4个污水处理厂的活性污泥中细菌的分离鉴定和抗生素耐药性分析 …… 葛峰,郭坤,周广灿,张会娟,刘济宁,戴亦军(1646)
焦化废水中苯酚降解菌筛选及其降解性能 …… 陈春,李文英,吴静文,李静(1652)
Xanthobacter flavus DT8降解二噁烷的特性研究 …… 金小君,陈东之,朱润晔,陈静,陈建孟(1657)
未开发油气田地表烃氧化菌空间定量分布 …… 满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强(1663)
矿化垃圾中氧化甲烷兼性营养菌的筛选与生物特性研究 …… 赵天涛,项锦欣,张丽杰,全学军,赵由才(1670)
长江中游干流及22条支流表层水中多氯联苯的分布特征及其潜在风险 …… 李昆,赵高峰,周怀东,曾敏,廖柏寒,吴正勇,张盼伟,郝红(1676)
典型血吸虫病疫区表层水中酚类化合物的污染特征及潜在风险 …… 吴正勇,赵高峰,周怀东,李科林,曾敏,李昆,张盼伟,郝红(1682)
闽江福州段沉积物中多环芳烃的空间分布异质性研究 …… 陈卫锋,倪进治,杨红玉,魏然,杨玉盛(1687)
三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价 …… 王健康,高博,周怀东,陆瑾,王雨春,殷淑华,郝红,袁浩(1693)
典型电器工业区河涌沉积物中重金属的分布和潜在生态风险 …… 邓代永,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许玫英(1700)
密云水库上游金属矿区土壤中重金属形态分布及风险评价 …… 高彦鑫,冯金国,唐磊,朱先芳,刘文清,季宏兵(1707)
湘西花垣矿区土壤重金属污染及其生物有效性 …… 杨胜香,袁志忠,李朝阳,龙华,唐文杰(1718)
基于GIS的某训练场土壤重金属污染评价 …… 刘玉通,方振东,杨琴,谢朝新,王大勇,毛华军(1725)
土壤质地和湿度对SVE技术修复苯污染土壤的影响 …… 刘少卿,姜林,姚珏君,李艳霞,刘希涛,林春野(1731)
蒙脱土、高岭土和针铁矿对DNA吸附与解吸特征 …… 王慎阳,饶伟,王代长,张亚楠,李腾,唐冰培,杨世杰(1736)
LNAPL在砂质含水层中动态迁移的电阻率法监测试验研究 …… 潘玉英,贾永刚,郭磊,李进军,单红仙(1744)
亚临界水解预处理稻草秸秆制备活性炭及表征 …… 董宇,申哲民,雷阳明,王茜,刘婷婷(1753)
蓝藻好氧堆肥及其氮素损失控制的研究 …… 任云,崔春红,刘奋武,占新华,周立祥(1760)
固定化微生物技术修复PAHs污染土壤的研究进展 …… 钱林波,元妙新,陈宝梁(1767)
《环境科学》征订启事(1483) 《环境科学》征稿简则(1620) 信息(1490,1496,1586,1743)

酞酸酯在模拟海河菹草微宇宙中的消减和分布特征

迟杰,杨青
(天津大学环境科学与工程学院,天津 300072)

摘要: 模拟海河干流水体构建了室内菹草微宇宙,同时设置了无菹草微宇宙为对照,对微宇宙中酞酸二丁酯(DBP)和酞酸二异辛酯(DEHP)的消减和分布特征进行了研究. 结果表明,实验过程中,有草组水和沉积物中这 2 种酞酸酯(PAEs)的浓度始终低于对照组; 实验结束时,这 2 种 PAEs 主要分布在沉积物中,其次是水中,并且在菹草中也有一定程度的富集,尤其是疏水性较强的 DEHP; 菹草(以湿重计)对水中 DBP 和 DEHP 富集系数(BCF)的平均值分别为 22.4 $L\cdot kg^{-1}$ 和 180.7 $L\cdot kg^{-1}$; 计算得出整个实验过程中,有草微宇宙中 DBP 和 DEHP 的降解率分别为输入量的 94.2% 和 60.8%,较对照组(DBP 和 DEHP 分别为 91.0% 和 45.5%)分别提高了 4.1 和 15.3 个百分点; 有草组 DBP 和 DEHP 的残留率分别为输入量的 -0.6% 和 30.7%,而对照组为 4.7% 和 37.7%. 可见,菹草体系不仅能够有效增强这 2 种 PAEs 的降解作用,还能减少系统残留量,降低内源污染.

关键词:酞酸酯; 微宇宙; 菹草; 根际效应; 去除效率
中图分类号: X52 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2012)05-1570-05

Removal and Distribution of Phthalate Acid Esters in *Potamogeton crispus* L. Microcosm of Haihe River

CHI Jie, YANG Qing
(School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Removal and distribution characteristics of dibutyl phthalate (DBP) and di(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) were studied by an indoor *Potamogeton crispus* L. microcosm simulating the mainstream of Haihe River. An unplanted microcosm was set as a control. The results showed that concentrations of the two phthalate acid esters (PAEs) in water and sediments from the *Potamogeton crispus* L. microcosm were lower than those from the control microcosm during the experiment. At the end of the experiments, the two PAEs mainly distributed in the sediment, and followed by water. The two PAEs, especially DEHP which is a stronger hydrophobic compound, could be enriched in *Potamogeton crispus* L.. The average enrichment coefficients (BCF) of *Potamogeton crispus* L. were 22.4 $L\cdot kg^{-1}$ for DBP and 180.7 $L\cdot kg^{-1}$ for DEHP. Removal efficiencies of loaded DBP and DEHP in the *Potamogeton crispus* L. microcosm (94.2% for DBP, 60.8% for DEHP) were 4.1 and 15.3 percentage points higher than those in the control microcosm (91.0% for DBP, 45.5% for DEHP). The retained percentages of loaded DBP and DEHP were -0.6% and 30.7% in the *Potamogeton crispus* L. microcosm, and 4.7% and 37.7% in the control microcosm, respectively, indicating that *Potamogeton crispus* L. can not only enhance the degradation of the two PAEs, but also decrease the amount of their residue, reducing the internal pollution sources.

Key words: phthalate acid esters (PAEs); microcosm; *Potamogeton crispus* L.; rhizosphere effect; removal efficiency

酞酸酯(PAEs)是一类重要的有机化合物,主要用作塑料的增塑剂[1]. PAEs 不仅具有一般毒性和致畸、致突变以及致癌活性,还具有扰乱动物内分泌的作用[2]. 最常见的 PAEs 有酞酸二丁酯(DBP)和酞酸二异辛酯(DEHP)等,是美国环境保护署和我国优先监测的污染物. PAEs 在环境中残留期较长,且生物对其具有较强的富集作用,因此一旦进入生态系统,将对公众健康带来巨大的危害.

沉水植物是指植物体全部位于水层下面,根生于沉积物中的大型水生植物. Armitage 等[3]指出,沉水植物可以从两方面影响有机污染物的迁移转化: 一是削弱作用,可以减缓污染物向下游水体的迁移,二是重新分配作用,可以通过促淤作用和截留颗粒物的作用而影响污染物在沉积物中的分布. 此外,沉水植物还能够富集和降解有机污染物[4]. 在利用沉水植物改良水体水质的研究中,大多都集中在其对 N、P 等营养物质的去除方面,而对有机污染物迁移转化的影响方面的研究鲜见报道.

海河是我国华北地区的一条大河,由于水资源严重短缺,加之汛期市政污水排入海河,造成了海河水质污染日益严重. 海河水体中普遍检测出 DBP 和 DEHP 的存在,它们是 PAEs 的 2 个主要污染物,浓度超过我国地表水标准限值,倍数高达 14 倍[5]. 菹草(*Potamogeton crispus* L.)是海河春季中占据水体的主

收稿日期: 2011-07-24; **修订日期**: 2011-09-22
基金项目: 国家自然科学基金项目(20777052)
作者简介: 迟杰(1964 ~),女,博士,教授,主要研究方向为污染生态化学,E-mail: cjiechi@yahoo.com

要沉水植物. 本实验选取菹草作为研究对象,通过实验室微宇宙模拟的方式,分析菹草对海河水环境中 DBP 和 DEHP 的消减以及分布特征的影响,以期为利用沉水植物修复受有机物污染水体提供数据支持.

1　材料与方法

1.1　沉积物的制备与植物的获得

于 2010 年 10 月采集海河表层 15 cm 的底泥,湿法过筛(2 mm)后于通风处自然阴干,压碎. 从海河采集菹草,经组织培养繁殖后[6],放入经过曝气的自来水中备用.

土壤 pH 值采用电位测定法; 密度采用比重瓶法; 总氮分析采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法; 总磷分析采用过硫酸钾消解-钼锑分光光度法[7]; TOC 的测定采用总有机碳分析仪(岛津 TOC-V CPH); 微生物的测定采用稀释平板法[8].

1.2　微宇宙系统的构建

为了研究菹草体系对 DBP 和 DEHP 的去除作用,本实验采用 2 组微宇宙系统,即有草组和无草的对照组. 具体方法是:取 50 cm × 20 cm × 30 cm 的水族箱 2 个,底部铺约 3 cm 厚的海河底泥,一组栽种一定量菹草,密度大约5 $g \cdot L^{-1}$[9],另一组不栽草. 2 缸均加入约 20 L 经曝气的自来水,稳定一周左右. 实验开始后,控制进、出水流速相等(200 $mL \cdot h^{-1}$),进水中含大约 0.5 $mg \cdot L^{-1}$的 DBP 和 DEHP. 光照强度(2 200 ± 100)lx,光暗比为 12 h∶12 h,控制温度在(20 ± 1)℃. 实验连续进行 480 h. 每隔一定时间(第 0、10、24、48、96、144、192、240、297、336、408 和 480 h)采集水、底泥和植物的样品,分析 DBP 与 DEHP 的浓度.

1.3　样品的采集与处理

水样:用虹吸法取水表面下 10 cm 左右的水样 10 mL,置于 25 mL 具塞比色管中,加入 1 mL 二氯甲烷,充分振摇 10 min,静置分层,共萃取 3 次,合并有机相后 N_2 吹定容.

植物样:取植物的茎叶部分,蒸馏水冲洗后吸干表面水分,称取 1 g,剪碎后放入组织研磨器,加 5 mL 二氯甲烷,研磨 5 min. 移出植物匀浆至40 mL 离心管中, 4 000 $r \cdot min^{-1}$离心 10 min,吸取二氯甲烷层至 K-D 浓缩器中 N_2 吹定容.

沉积物样:取 1 g 沉积物(冷冻干燥后过 80 目筛)于 10 mL 离心管中,加 3 mL 二氯甲烷,超声萃取 10 min,然后4 000 $r \cdot min^{-1}$离心 5 min,重复 3 次合并有机相,N_2 吹定容.

以上样品每组均做 3 个平行. 萃取浓缩液定容后,GC-FID 分析. DBP 和 DEHP 的加标回收率分别为:水样 117.6% 和 81.6%; 沉积物样品 99.2% 和 97.9%; 菹草样品 90.1% 和 99.0%.

实验前后沉积物的理化性质和 2 种 PAEs 的本底值如表 1 所示.

表 1　沉积物的理化性质和 PAEs 的本底值

Table 1　Physicochemical property of sediments and background concentrations of PAEs in sediments

时间	项目	密度 /$g \cdot mL^{-1}$	pH	TOC /%	总氮质量浓度 /$mg \cdot kg^{-1}$	总磷质量浓度 /$mg \cdot kg^{-1}$	PAEs 本底/$mg \cdot kg^{-1}$	
							DBP	DEHP
实验初始		1.26	7.9	2.18	302.1	966.5	0.97	1.38
480 h	有草组根际	1.13	7.9	2.69	85.3	703.1	—[1)]	—
480 h	有草组非根际	1.21	7.8	2.94	202.6	785.3	—	—
480 h	对照组	1.23	7.9	3.14	254.1	817.9	—	—

1)"—"表示无数值,下同

1.4　气相色谱分析条件

Agilent 6890 N 型气相色谱仪,FID 检测器; HP-5 型石英毛细管色谱柱(30.0 m × 320 μm × 0.25 μm); 进样口 250℃,检测器 250℃; N_2 流量 25 $mL \cdot min^{-1}$,H_2 流量 45 $mL \cdot min^{-1}$,空气流量 450 $mL \cdot min^{-1}$; 进样量 1 μL; 程序升温:130℃(1 min)→25℃ $\cdot min^{-1}$→280℃(3 min).

1.5　降解率的计算

整个实验过程中系统对 PAEs 的降解率为系统对 PAEs 的降解量占 PAEs 输入量的百分比. 其中:

$$\text{PAEs 的降解量} = \sum_{t=0}^{480}[(c_{in} - c_{out}) \times \Delta t] \times 0.2\ L \cdot h^{-1} - (\text{系统中 PAEs 的残留量})$$

系统中 PAEs 的残留量 = (实验结束时系统各介质中 PAEs 量之和) - (各介质中 PAEs 本底量之和).

式中,c_{in}和 c_{out}分别代表进水浓度和瞬时出水浓度,$mg \cdot L^{-1}$; Δt 为 2 次采样时间间隔,h.

2　结果与分析

2.1　酞酸酯在微宇宙各介质中浓度分布

水中 DBP 和 DEHP 浓度随时间的变化趋势如图 1 所示. 2 组实验中 DBP 浓度变化趋势基本同步,只是有草组的浓度低于对照组; DEHP 浓度的变化特点

与 DBP 类似. 对比 2 种 PAEs 发现,DEHP 的浓度水平整体要比 DBP 高,上升趋势也比 DBP 明显. 整个实验过程中,有草组水中 2 种 PAEs 的浓度平均较对照组分别低 33% 和 48%,差异十分显著($P<0.01$).

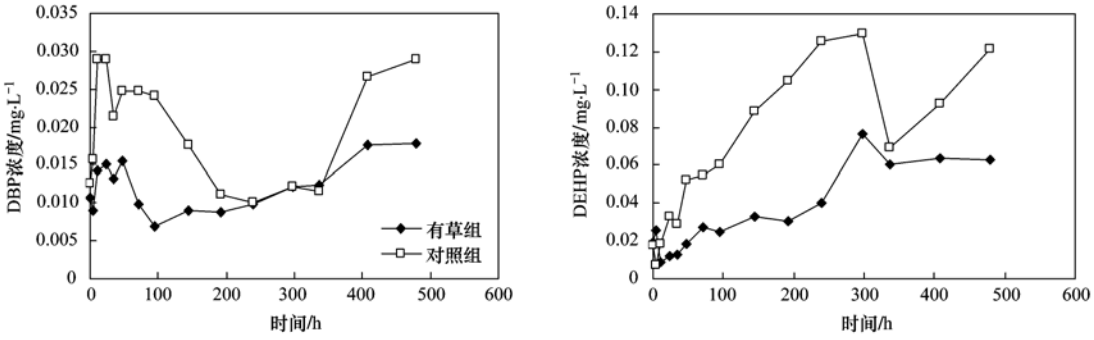

图 1 水中 DBP 和 DEHP 浓度

Fig. 1 Concentrations of DBP and DEHP in water

沉积物中 DBP 和 DEHP 的浓度变化如图 2 所示. 实验初期(0 ~ 50 h),对照组中这 2 种 PAEs 的浓度上升较快,有草组上升较为缓慢; 随后 2 组均有一定的波动,有草组的波动更大. 整个实验过程中,有草组沉积物中 DBP 和 DEHP 的浓度平均较对照组分别低 35% 和 18%,差异显著($P<0.05$).

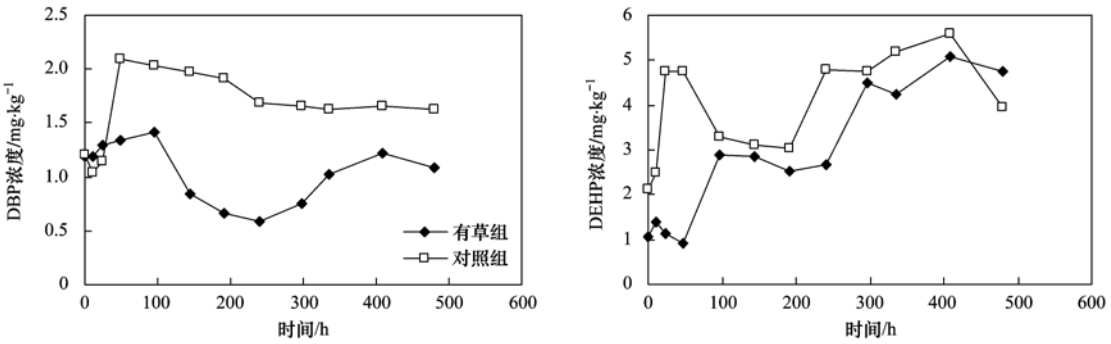

图 2 沉积物中 DBP 和 DEHP 含量

Fig. 2 Concentrations of DBP and DEHP in sediments

菹草中 DBP 和 DEHP 的浓度变化如图 3 所示. 菹草茎叶中 DBP 的浓度(以湿重计)在实验初始迅速上升,之后逐渐趋于平缓; 而 DEHP 则是不断上升. 整个实验过程中,DEHP 的浓度平均是 DBP 的 30 倍左右.

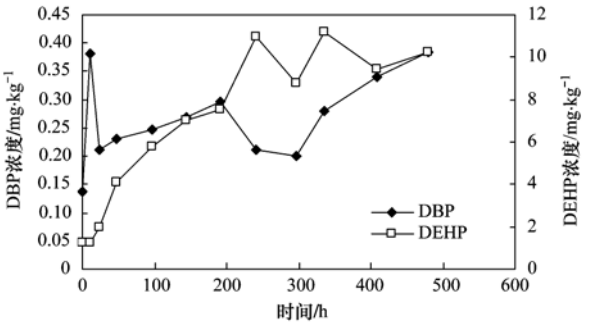

图 3 菹草中 DBP 和 DEHP 含量

Fig. 3 Concentrations of DBP and DEHP in *Potamogeton crispus* L.

2.2 微生物

在实验结束时测定了系统中的微生物量(见表 2)和沉积物的理化性质(见表 1). 结果表明,对于沉积物而言,有草组的根际沉积物中微生物量最大,消耗的碳源和营养盐也最多,其次是有草组的非根际

表 2 实验结束时水和沉积物中的微生物量

Table 2 Microbial biomass in water and sediments at the end of experiments

微生物	土(干)中菌落数 $\times 10^6$/个·g^{-1}			水中菌落数 $\times 10^6$/个·mL^{-1}	
	根际土	非根际土	对照土	水	对照水
细菌	81.7 ± 2.1	17.6 ± 0.2	13.1 ± 0.6	0.31 ± 0.03	0.48 ± 0.09
真菌	0.202 ± 0.002	0.084 ± 0.001	0.014 ± 0.002	—	—
PAE 降解菌	2.46 ± 0.03	0.73 ± 0.01	0.41 ± 0.03	0.036 ± 0.001	0.036 ± 0.004

沉积物，对照组沉积物的微生物量最小，消耗的碳源和营养盐也最少；对于水相而言，对照组水中细菌数量略多于有草组.

3　讨论

3.1　微宇宙系统对酞酸酯的消减和菹草的富集作用

DBP 和 DEHP 输入到微宇宙系统后，系统对这 2 种 PAEs 的消减主要包括残留（扣除本底值）和降解两部分，其余以平流方式迁出. 计算得出整个实验过程中有草微宇宙对 DBP 和 DEHP 的降解率分别为 94.2% 和 60.8%，较对照组（DBP 和 DEHP 分别为 91.0% 和 45.5%）分别提高了 4.1 和 15.3 个百分点，说明菹草能够有效提高系统对这 2 种 PAEs 的降解. 根据微生物的结果可以看出，有草组与对照组的土中微生物量有一定的差异，尤其是有草组的根际土，比对照组土中微生物量要高出数倍. 所以，有草组降解能力的提高在很大程度上归功于菹草的根际环境[10]. 此外，2 组实验中 DBP 的降解率均高于 DEHP. 据报道[11]，PAEs 类化合物的生物降解性受化合物分子大小决定，而分子的大小由支链组成决定. 与 DEHP 相比，DBP 支链小，化合物的空间位阻小，易于微生物利用，使去除率相对较高.

整个实验过程中，有草组 DBP 和 DEHP 的残留率分别为 −0.6% 和 30.7%，而对照组分别为 4.7% 和 37.7%. DBP 残留率的增加程度显著高于 DEHP，与菹草系统中 DEHP 降解率提高程度明显高于 DBP 的结果一致. 实验初期，系统中 DBP 和 DEHP 的消减以残留为主，之后逐渐过渡为以降解为主，有草组和对照组中降解占输入量的比例分别于 96 h 和 48 h 后在 100% 附近波动. 波动的主要原因是这 2 种 PAEs 输入到水中后先是分配到沉积物和菹草中，然后再进一步被降解，由于这些过程呈现一定的波动性，使系统降解率也出现了相应的波动.

实验结束时，DBP 和 DEHP 在各相中残留量占总残留量的百分比（质量分数）如表 3 所示. 从中可看出，这 2 种 PAEs 主要分布在沉积物中. 有草组各相中，DBP 所占比例顺序为沉积物相 > 水相 > 根际沉积物 > 菹草（茎叶）> 菹草（根），DEHP 所占比例顺序为沉积物相 > 水相 > 菹草（茎叶）> 根际沉积物 > 菹草（根）. 这 2 种 PAEs，尤其是 DEHP，在菹草中所占比例不容忽视. 实验过程中菹草对 DBP 和 DEHP 的富集系数（BCF）分别为 12.9 ~ 35.3 $L\cdot kg^{-1}$（均值 22.4 $L\cdot kg^{-1}$）和 66.2 ~ 272.0 $L\cdot kg^{-1}$（均值 180.7 $L\cdot kg^{-1}$），均显著大于 1 $L\cdot kg^{-1}$，可见菹草对 DBP 和 DEHP 的富集作用都很明显.

表 3　实验结束时 PAEs 在各相中的残留百分比/%

Table 3　Percentages of PAEs in each phase/%

项目		水相	沉积物相	菹草（茎叶）	菹草（根）	根际沉积物
有草组	DBP	7.12	90.22	0.88	0.01	1.77
	DEHP	5.51	87.09	5.18	0.12	2.09
对照组	DBP	7.83	92.17	—	—	—
	DEHP	13.68	92.92	—	—	—

3.2　菹草的根际效应

对比沉积物中微生物量可以发现，有草组的根际沉积物中微生物量最大，显著高于非根际沉积物，这是因为菹草根系分泌有机酸、糖类、氨基酸等[12]，为微生物提供营养源，使其能够大量繁殖. 有草组的非根际沉积物中微生物量略高于对照组沉积物，这可能是因为菹草的促淤作用使营养物质（包括菹草碎屑）进入沉积物中，为微生物提供了更多的营养物质.

在实验结束时测定了菹草根中以及根际沉积物中 DBP 和 DEHP 的浓度，发现根中 DBP 和 DEHP 的浓度分别是茎叶中浓度的 1.6 和 3.0 倍. 原因是沉积物对 DBP 和 DEHP 的吸附能力较强，使沉积物中这 2 种污染物的含量相对较高. 有草组根际沉积物中 DEHP 的浓度高于非根际（4.1 倍），而 DBP 则不明显（1.04 倍），与海河现场采样结果一致[5]. 有研究表明，植物能够利用根际作用有效去除污染物，并表现出根际沉积物中污染物的含量低于非根际，其原因主要是根际效应使根际微生物降解作用增强的结果[13]. 然而，本研究的结果与此相反. 这是由于影响根际沉积物中污染物浓度的因素较复杂，不仅存在根际微生物的作用，还存在污染物在根的作用下由非根际向根际沉积物的迁移作用[14]，以及根与根际沉积物间的物质传输等过程[15]. 具体原因还需要进一步地研究.

4　结论

（1）实验过程中有草组水相和沉积物相中 DBP

和 DEHP 的浓度始终低于对照组. 菹草根际微生物数量最多,其次是有草组的非根际沉积物,对照组沉积物的微生物量最小. 计算得出,实验期间有草组对 DBP 和 DEHP 的降解率均高于对照组,说明菹草能够有效提高系统对这 2 种 PAEs 的降解能力,降低系统残留量.

(2) 菹草对 DBP 和 DEHP 的富集系数(BCF)分别为 12.9 ~ 35.3 $L\cdot kg^{-1}$(均值 22.4 $L\cdot kg^{-1}$)和 66.2 ~272.0 $L\cdot kg^{-1}$(均值 180.7 $L\cdot kg^{-1}$),均显著大于 1 $L\cdot kg^{-1}$,说明菹草对这 2 种 PAEs 的富集作用都很明显.

(3) 实验结束时,有草组各相中 DBP 残留量占总残留量的百分比顺序为沉积物相 > 水相 > 根际沉积物 > 菹草(茎叶) > 菹草(根),DEHP 所占比例顺序为沉积物相 > 水相 > 菹草(茎叶) > 根际沉积物 > 菹草(根).

(4) 菹草不仅自身能够吸附和吸收 DBP 和 DEHP,而且能够通过根际作用改变根际沉积物的性质,增加根际环境中的微生物量,进而提高对这 2 种 PAEs 的降解能力,这对利用沉水植物修复受有机物污染的水体的研究和应用具有重要意义.

参考文献:

[1] Oliver R, May E, Williams J. Microcosm investigations of phthalate behaviour in sewage treatment biofilms[J]. Science of the Total Environment, 2007, **372**(2-3): 605-614.

[2] Matsumoto M, Hirata-Koizumi M, Ema M. Potential adverse effects of phthalic acid esters on human health: a review of recent studies on reproduction [J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2008, **50**(1): 37-49.

[3] Armitage J M, Franco A, Gomez S, *et al*. Modeling the potential influence of particle deposition on the accumulation of organic contaminants by submerged aquatic vegetation [J]. Environmental Science and Technology, 2008, **42**(11): 4052-4059.

[4] Karen D J, Joab B M, Wallin J M, *et al*. Partitioning of chlorpyrifos between water and an aquatic macrophyte (*Elodea densa*)[J]. Chemosphere, 1998, **37**(8): 1579-1586.

[5] Chi J. Phthalate acid esters in *Potamogeton crispus* L. from Haihe River, China[J]. Chemosphere, 2009, **77**(1): 48-52.

[6] Zhou C F, An S Q, Jiang J H, *et al*. An in vitro propagation protocol of two submerged macrophytes for lake revegetation in east China[J]. Aquatic Botany, 2006, **85**(1): 44-52.

[7] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 243-257.

[8] 赵斌, 何少江. 微生物学实验[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 69-72.

[9] Xie Y H, An S Q, Wu B F, *et al*. Density-dependent root morphology and root distribution in the submerged plant *Vallisneria natans*[J]. Environmental and Experimental Botany, 2006, **57**(1-2): 195-200.

[10] Abhilash P C, Srivastava S, Singh N. Comparative bioremediation potential of four rhizospheric microbial species against lindane[J]. Chemosphere, 2011, **82**(1): 56-63.

[11] Xu G, Li F S, Wang Q H. Occurrence and degradation characteristics of dibutyl phthalate(DBP) and di-(2-ethylhexyl) phthalate(DEHP) in typical agricultural soils of China[J]. Science of the Total Environment, 2008, **393**(2-3): 333-340.

[12] Vangronsveld J, Herzig R, Weyens N, *et al*. Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: lessons from the field[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2009, **16**(7): 765-794.

[13] 徐建明, 何艳. 根-土界面的微生态过程与有机污染物的环境行为研究[J]. 土壤, 2006, **38**(4): 353-358.

[14] Liste H H, Alexander M. Accumulation of phenanthrene and pyrene in rhizosphere soil[J]. Chemosphere, 2000, **40**(1): 11-14.

[15] Jiao X C, Xu F L, Dawson R, *et al*. Adsorption and absorption of polycyclic aromatic hydrocarbons to rice roots [J]. Environmental Pollution, 2007, **148**(1): 230-235.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 33 No. 5

May 15, 2012

CONTENTS

Using Look-up Table Method in the Simulation of Regional Atmospheric Environment ····· XIE Min, WANG Ti-jian, JIANG Fei, *et al.* (1409)

Applications of Pollutants Released form Crop Residues at Open Burning in Yangtze River Delta Region in Air Quality Model ····· SU Ji-feng, ZHU Bin, KANG Han-qing, *et al.* (1418)

Atmospheric Dry Deposition Flux and Sources of Monocarboxylic Acids in Beijing and Surrounding Cities ····· XU Xiao-juan, LI Xing-ru, WANG Yue-si, *et al.* (1425)

Comparison of Physicochemical Characterization of Shanghai Ambient Ultrafine Particles and Engineered Nano Particles and Their Cytotoxicity ····· ZHANG Rui, LÜ Sen-lin, SHANG Yu, *et al.* (1431)

Element Compositions and Source of $PM_{2.5}$ Aerosols in Qingdao ····· LI Xiu-zhen, SHENG Li-fang, XU Hua, *et al.* (1438)

Phthalate Esters Pollution in Household Indoor Air Particles of Tianjin in Winter ····· WANG Fu-mei, CHEN Li, JIAO Jiao, *et al.* (1446)

Application of a Resuspension Test Chamber in $PM_{2.5}$ Source Profile Analysis ····· DUAN Heng-yi, QIAN Ran-ran, WU Shui-ping, *et al.* (1452)

Distribution and Enrichment of Trace Elements in Coal Combustion Products from Southwestern Guizhou ····· WEI Xiao-fei, ZHANG Guo-ping, LI Ling, *et al.* (1457)

Air-Water Surface Greenhouse Gas Flux in Pengxi River at Different Operational Stages of the Three Gorges Reservoir ····· JIANG Tao, GUO Jing-song, LI Zhe, *et al.* (1463)

Fluxes of Greenhouse Gases from Xiangxi River in Summer and Their Influencing Factors ····· WANG Liang, XIAO Shang-bin, LIU De-fu, *et al.* (1471)

Effects of Elevated Ozone Concentration and Soil Moisture on Temperature Sensitivity of Soil Microbial Respiration in a Cropland ····· CHEN Shu-tao, ZHANG Yong, HU Zheng-hua, *et al.* (1476)

Hydrochemical Characteristics in the Glacier No. 72 of Qingbingtan, Tomur Peak ····· ZHAO Ai-fang, ZHANG Ming-jun, LI Zhong-qin, *et al.* (1484)

Mineralization Characteristics of Dissolved Organic Phosphorous in Wudalianchi Lake, China ····· ZHANG Bin, XI Bei-dou, ZHAO Yue, *et al.* (1491)

Speciation Distribution of Nitrogen in Sediments of 7 Rivers around Taihu Lake ····· LU Shao-yong, YUAN Ye, JIN Xiang-can, *et al.* (1497)

Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Sediments from Shiwuli Stream in Lake Chaohu ····· LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia, *et al.* (1503)

Surface Water Quality of Beiyun Rivers Basin and the Analysis of Acting Factors for the Recent Ten Years ····· GUO Jing, JING Hong-wei, LI Jin-xiang, *et al.* (1511)

Water Quality Impact of Dongjiang River Network Caused by Dongguan Canal Drainage ····· SUN Lei, MAO Xian-zhong, HUANG Min-min (1519)

Groundwater Pollution Sources Identification and Grading in Beijing Plain ····· LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, *et al.* (1526)

3D Numerical Simulation of Air Sparging Remediation Process ····· LI Heng-zhen, HU Li-ming, WANG Jian, *et al.* (1532)

Numerical Experiment Study on the Algae Suppression Effect of Vertical Hydrodynamic Mixers ····· ZOU Rui, ZHOU Jing, SUN Yong-jian, *et al.* (1540)

Microbial Mechanism of Pollutants Removal in New Biological Island Grid ····· GAO Ming-yu, XIE Hui-jun, WANG Wen-xing (1550)

Effect of Nutrition Level of Phosphorus and Nitrogen on the Metabolism of the Extracellular Organic Matter of *Nostoc flagelliforme* ····· QI Fei, LIU Xiao-yuan, XU Bing-bing, *et al.* (1556)

Inhibitory Effects of Liquor Cultured with *Hydrodictyon reticulatum* on the Growth of *Microcystis aeruginosa* ····· FU Hai-yan, CHAI Tian, ZHAO Kun, *et al.* (1564)

Removal and Distribution of Phthalate Acid Esters in *Potamogeton crispus* L. Microcosm of Haihe River ····· CHI Jie, YANG Qing (1570)

Control and Removal of Microcystin Production of *Microcystis aeruginosa* by Irradiation of Electron Beam ····· LIU Shu-yu, WU Ming-hong, JIANG Qin-peng (1575)

Source Characteristics Analysis of Discharge and Pollutants in Typical Drainage Ditch of Qingtongxia Irrigation District ····· LI Qiang-kun, HU Ya-wei, LUO Liang-guo (1579)

Degradation of TBBPA by Electron Beam Radiolysis ····· LI Jie, XU Dian-dou, XU Gang, *et al.* (1587)

Catalytic Ozonation of Ibuprofen in Aqueous Solution by Activated Carbon Made from Sludge and Corn Cob ····· WANG Hong-juan, QI Fei, FENG Li, *et al.* (1591)

Effect of High Hydraulic Loading on Intensive Shrimp Aquaculture Wastewater Treatment Performance in Constructed Wetland ····· LI Huai-zheng, ZHANG Xing-yi, CHEN Wei-bing, *et al.* (1597)

Factors Influencing the Formation of NDMA During Chloramination Disinfection of Effluent from Biological Nitrogen Removal System for the Treatment of Municipal Sewage ····· SHANG Xiao-ling, LI Yong-mei (1604)

Denitrification Using Starch/PCL Blends as Solid Carbon Source ····· SHEN Zhi-qiang, WU Wei-zhong, YANG Chun-ping, *et al.* (1609)

Profiles of Zeta Potential and EPS in Granulation Process of Aerobic Sludge ····· WANG Hao-yu, SU Ben-sheng, HUANG Dan, *et al.* (1614)

Biosorption Characteristics of f2 Bacteriophage onto Activated Sludge ····· ZHOU Yu-fen, ZHENG Xiang, LEI Yang, *et al.* (1621)

Adsorption of Anionic Polyacrylamide on the Surface of Ion Exchange Membranes ····· DENG Meng-jie, YU Shui-li, SHI Wen-xin, *et al.* (1625)

Adsorption of Amphoteric Modified Bentonites to Phenol and Its Thermodynamics ····· LI Ting, MENG Zhao-fu, ZHANG Bin (1632)

Effect of Surfactants on Sorption and Desorption of Benzo[a]pyrene onto Black Carbon ····· ZHANG Jing-huan, CHEN Chun-rong, ZHANG Wei-hang, *et al.* (1639)

Isolation and Identification of Bacteria in the Activated Sludge from Four Sewage Treatment Plants in Nanjing City and Its Antibiotic Resistance Analysis ····· GE Feng, GUO Kun, ZHOU Guang-can, *et al.* (1646)

Screening and Characterization of Phenol Degrading Bacteria for the Coking Wastewater Treatment ····· CHEN Chun, LI Wen-ying, WU Jing-wen, *et al.* (1652)

Characteristics of 1,4-Dioxane Degradation by *Xanthobacter flavus* DT8 ····· JIN Xiao-jun, CHEN Dong-zhi, ZHU Run-ye, *et al.* (1657)

Spatial Quantitative Distribution of Hydrocarbon-Oxidizing Bacteria of Unexploited Oil and Gas Fields ····· MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, *et al.* (1663)

Screening and Biological Characteristics of Amphitrophic Methane-Oxidizing Bacteria from Aged-Refuse ····· ZHAO Tian-tao, XIANG Jin-xin, ZHANG Li-jie, *et al.* (1670)

Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from 22 Tributaries and Mainstream in Middle Reaches of Yangtze River ····· LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, *et al.* (1676)

Pollution Characteristics and Potential Risks of Phenolic Compounds in Schistosomiasis Epidemic Areas ····· WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, *et al.* (1682)

Spatial Heterogeneity and Autocorrelation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediment of Minjiang River in Fuzhou City ····· CHEN Wei-feng, NI Jin-zhi, YANG Hong-yu, *et al.* (1687)

Heavy Metals Pollution and Its Potential Ecological Risk of the Sediments in Three Gorges Reservoir During Its Impounding Period ····· WANG Jian-kang, GAO Bo, ZHOU Huai-dong, *et al.* (1693)

Investigation on the Distribution and Potential Ecological Risk of Heavy Metal in the Sediments from Typical Electrical Industrial Zone ····· DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, GUO Ju, *et al.* (1700)

Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Iron and Gold Mine Soil of Miyun Reservoir Upstream ····· GAO Yan-xin, FENG Jin-guo, TANG Lei, *et al.* (1707)

Heavy Metal Contamination and Bioavailability in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi ····· YANG Sheng-xiang, YUAN Zhi-zhong, LI Zhao-yang, *et al.* (1718)

Evaluation of Heavy Metal Pollution in Soils from a Training Ground Based on GIS ····· LIU Yu-tong, FANG Zhen-dong, YANG Qin, *et al.* (1725)

Effects of Soil Texture and Water Content on Remediation of SVE on Soils Contaminated by Benzene ····· LIU Shao-qing, JIANG Lin, YAO Yu-jun, *et al.* (1731)

Characteristics of DNA Adsorption and Desorption in Montmorillonite, Kaoline and Goethite ····· WANG Shen-yang, RAO Wei, WANG Dai-zhang, *et al.* (1736)

LNAPL Migration Monitoring in Simulated Sand Aquifer Using Resistivity Method ····· PAN Yu-ying, JIA Yong-gang, GUO Lei, *et al.* (1744)

Preparation and Characterization of Activated Carbon from Rice Straw Pre-treated by the Subcritical Hydrolysis ····· DONG Yu, SHEN Zhe-min, LEI Yang-ming, *et al.* (1753)

Study on Composting of Cyanobacteria Amended with Different N Loss Inhibitor ····· REN Yun, CUI Chun-hong, LIU Fen-wu, *et al.* (1760)

Research Progress About Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Contaminated Soil with Immobilized Microorganism Technique ····· QIAN Lin-bo, YUAN Miao-xin, CHEN Bao-liang (1767)

《环境科学》第 6 届编辑委员会

主　编：欧阳自远

副主编：赵景柱　郝吉明　田　刚

编　委：（按姓氏笔画排序）

万国江　王华聪　王凯军　王绪绪　田　刚　田　静　史培军

朱永官　刘志培　汤鸿霄　陈吉宁　孟　伟　周宗灿　林金明

欧阳自远　赵景柱　姜　林　郝郑平　郝吉明　聂永丰　黄　霞

黄　耀　鲍　强　潘　纲　潘　涛　魏复盛

环 境 科 学

（HUANJING KEXUE）

（月刊　1976 年 8 月创刊）

2012 年 5 月 15 日　33 卷　第 5 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 33　No. 5　May 15, 2012

主　　管	中国科学院	**Superintended** by	Chinese Academy of Sciences
主　　办	中国科学院生态环境研究中心	**Sponsored** by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协　　办	（以参加先后为序） 北京市环境保护科学研究院 清 华 大 学 环 境 学 院	**Co-Sponsored** by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主　　编	欧 阳 自 远	**Editor-in -Chief**	OUYANG Zi-yuan
编　　辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱（海淀区双清路 18 号，邮政编码：100085） 电话：010-62941102，010-62849343 传真：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	**Edited** by	The Editorial Board of Environmental Science（HUANJING KEXUE） P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel：010-62941102, 010-62849343; Fax：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出　　版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717	**Published** by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing　100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	**Printed** by	Beijing Bei Lin Printing House
发　　行	科 学 出 版 社 电话：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com	**Distributed** by	Science Press Tel：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com
订　购　处	全国各地邮电局	**Domestic**	All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 （北京 399 信箱）	**Foreign**	China International Book Trading Corporation（Guoji Shudian）, P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号：ISSN 0250-3301 / CN 11-1895/X　　**国内邮发代号**：2-821

国 内 定 价：70.00 元　　**国外发行代号**：M 205

国 内 外 公 开 发 行