

沉水植物苦草 (*Vallisneria natans*) 对多环芳烃污染沉积物的修复作用*

张 雨^{1,2}, 晏再生^{2**}, 吴慧芳^{1**}, 江和龙², 郝 征^{2,3}

(1: 南京工业大学城市建设学院, 南京 211816)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(3: 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 沉水植物是浅水湖泊生态系统的关键种群, 对水环境质量及水生生态系统结构有重要影响. 以东太湖大水港和湖湾区 2 个典型的具有不同污染程度的沉水植物苦草 (*Vallisneria natans*) 生长区域为研究对象, 考察苦草对多环芳烃 (PAHs) 的修复效果. 结果表明, 经过 34 d 植物修复试验, 重度污染的东太湖大水港沉积物中 PAHs 的去除率为 62%, 沉积物中 PAHs 降解速率为 0.024 d^{-1} ; 而中度污染的东太湖湖湾区沉积物的 PAHs 去除率为 42%, 其降解速率为 0.015 d^{-1} . 种植苦草的沉积物中 PAHs 的降解速率是未种植苦草的降解速率的 2~3 倍. 苦草对沉积物中高分子量 PAHs 的修复效果尤为显著. 因此, 苦草可以有效地用于 PAHs 污染沉积物的修复, 尤其是在重污染和高分子量 PAHs 污染沉积物中, 苦草的修复作用更加明显.

关键词: 沉水植物; 苦草; 多环芳烃; 修复; 沉积物; 太湖

Remedial function of submersed macrophyte *Vallisneria natans* to PAHs-contaminated sediments

ZHANG Yu^{1,2}, YAN Zaisheng^{2**}, WU Huifang^{1**}, JIANG Helong² & HAO Zheng^{2,3}

(1: College of Urban Construction, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, P.R.China)

(2: State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

(3: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)

Abstract: Submersed macrophytes are an important functional and structural element of shallow aquatic ecosystems. Remedial function of submersed macrophyte (*Vallisneria natans*) to PAHs in freshwater sediments was investigated in different pollution levels in east Lake Taihu. Over a 34-day plant remediation experiment, the removal rate and the first-order rate constants of PAHs degradation in the heavily contaminated sediments of Dashui harbour from east Lake Taihu was 62% and 0.024 d^{-1} , respectively. However, 42% PAHs removal and 0.015 d^{-1} of PAHs degradation rate was also observed in the moderately contaminated sediments of east Lake Taihu bay. The degradation rate of PAHs in the planted sediments was 2–3 times higher than those in the unplanted sediments. The removal of high molecular weight (HMW) PAHs in sediments with planting *V. natans* was significantly observed. Thus, *V. natans* can be effectively used for the remediation of PAHs contaminated sediments, especially in heavily polluted and HMW-PAHs contaminated sediments.

Keywords: Submersed macrophyte; *Vallisneria natans*; PAHs; remediation; sediment; Lake Taihu

多环芳烃 (PAHs) 是环境中广泛存在的一类持久性有机污染物, 经地表径流、污水排放及大气颗粒迁移

* 国家自然科学基金项目 (41371456, 41671496)、江苏省自然科学基金重点研发计划 (BE2016703) 和污染控制与资源化研究国家重点实验室开放课题项目 (PCRRF13018) 联合资助. 2017-08-20 收稿; 2017-10-25 收修改稿. 张雨 (1993~), 女, 硕士研究生; E-mail: 568267337@qq.com.

** 通信作者; E-mail: zshyan@niglas.ac.cn, whfkl@sina.com.

和沉降而进入湖泊、河流等水体中,进入水体中的 PAHs 易于吸附在颗粒物上,极易聚集到沉积物中,因此沉积物被认为是其主要的归宿之一^[1-2]. 而水生植物,特别是沉水植物在污染沉积物的修复方面发挥着重要的作用. 苦草属(*Vallisneria*)是一类具有很强环境适应能力的沉水植物类群,不仅可以作为水体受污染程度的指示物种,对水环境质量进行监测^[3];且对沉积物中毒性有机污染物具有很好的修复性能^[4-7].

目前已有的研究表明沉水植物苦草(*Vallisneria spiralis*)可以有效地修复沉积物中菲^[4-5],种植苦草的沉积物中菲的去除率要提高 18%;苦草的根对菲的毒性效应最为敏感,苦草通过根部形态可塑性增强其抗逆境能力^[5]. 然而,已有的研究对修复过程中 PAHs 的降解动力学以及高分子量 PAHs 的修复效果并未涉及,且原有的研究是通过添加 PAHs 菲进入到沉积物中而开展,而实际情况下沉积物中 PAHs 污染水平以及污染状况更为复杂. 那么,生长在不同污染程度的沉积物中苦草是否对 PAHs 具有不同的修复效应? 沉积物中 PAHs 是否具有不同的降解特征? 这些问题的解决对于污染沉积物的生物修复在选择沉水植物方面显得尤为重要.

藉此,本文以东太湖 2 个典型的 PAHs 污染程度不同的沉水植物苦草生长区域为研究对象,采集 2 个区域的根际沉积物和苦草样品,研究不同污染程度的沉积物中苦草对 PAHs 的修复性能影响,分析不同污染程度下沉积物中 PAHs 降解行为和降解动力学,为沉水植物苦草在水体环境修复中的应用提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 采样点与材料

以东太湖 2 个典型的污染程度不同的沉水植物苦草生长区域为研究对象. 采样点分别为:样点 1 位于东太湖入湖河道大水港(31°4'N,120°24'E),是苏州东山镇船舶建造、船舶维修基地,大水港的水体常年处于溢油(机油、柴油等)污染(图 1A);样点 2 位于东太湖湖湾区,是太湖东南隅的一个浅水草型湖湾(31°6'N,120°25'E),是水生植物生长繁殖的一个重要区域(图 1B). 采集上述两个区域内的根际沉积物和苦草样品. 选取长势良好、带根且无损伤的苦草植株,其中大水港的苦草株高为 31±4 cm,东太湖湖湾区的苦草株高为 54±8 cm. 苦草经自来水冲洗干净,室内驯化后分别进行移栽. 同时采集苦草根际沉积物,其中大水港的根际沉积物呈明显的黝黑色,而东太湖湖湾区的根际沉积物表层呈灰色.

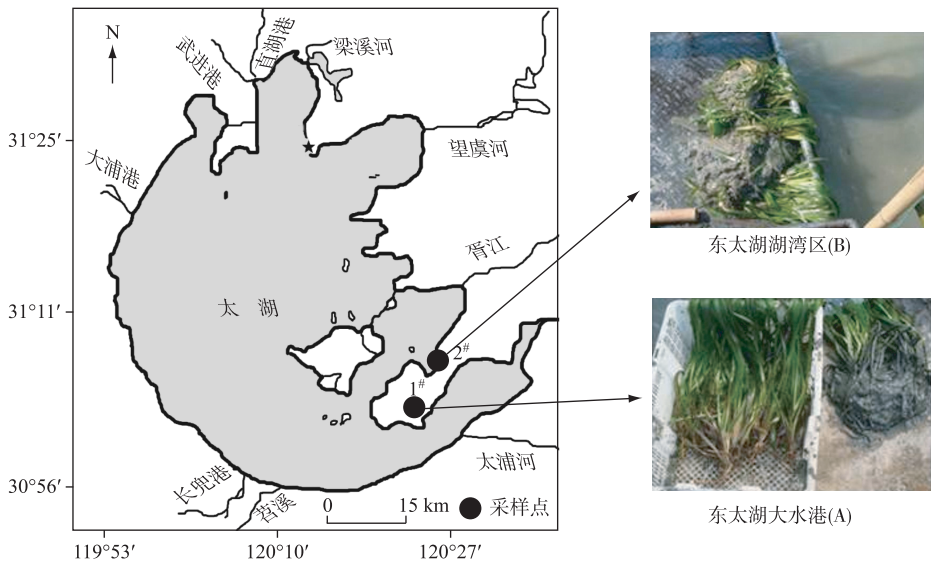


图 1 东太湖入湖河道大水港(A)和东太湖湖湾区(B)示意
Fig.1 The distribution of Dashui harbour(A) and the bay(B) of east Lake Taihu

1.2 试验设计

将采集的根际沉积物和苦草样品进行室内模拟试验. 试验设置 4 种处理组, 分别为: (1) 大水港苦草处理组; (2) 大水港对照组, 不种植苦草; (3) 东太湖湖湾区苦草处理组; (4) 东太湖湖湾区对照组, 不种植苦草. 每种处理组设 3 个平行, 共 12 个试验桶. 每个试验桶内放置约 520 g (湿重) 根际沉积物, 将大水港和东太湖湖湾区的苦草 (鲜重约 45 g) 分别移栽到试验桶内. 试验桶内上覆水为霍格兰氏营养液^[8], 水深为 70 cm. 试验过程中苦草的光照条件是 889~1261 lux. 实验前后测定苦草湿重和株高等生长指标.

1.3 样品的采集与处理

定期采集试验桶内根际沉积物样品 (每个试验桶内均匀采集 5 个点的沉积物柱状样品混合而成), 测定其 PAHs 含量, 同时分析试验前后沉水植物苦草的 PAHs 含量. 沉积物和苦草经冷冻干燥、研磨后过 60 目筛备用. 样品采用加速溶剂萃取方法 (ASE) 进行萃取^[9]: 称取 4 g 左右的样品粉末, 加入 8 g 左右的石英砂和 3 g 铜粉, 充分摇匀后装入加速溶剂萃取仪 (ASE, Dionex 100) 的萃取池中进行高温高压萃取. 萃取所用溶剂为色谱纯二氯甲烷, 加热温度为 100℃, 压力为 1500 psi, 每个样品静态提取 2 次, 每次 10 min. 将萃取完的溶液转移至蒸发瓶内, 通过旋转蒸发仪旋转蒸发至近干, 加入 5 ml 乙腈为置换溶剂, 继续浓缩至 3 ml 左右转移至 10 ml 刻度管中. 再将浓缩液通过弗罗里硅土的玻璃层析柱, 用乙腈淋洗有机组分, 收集乙腈淋洗液并旋蒸浓缩至 1 ml, 并转移至进样小瓶中, -20℃ 保存待仪器分析.

1.4 样品分析

PAHs 检测采用 Agilent 1200 高效液相色谱仪 (HPLC) 完成, 以二极管阵列紫外检测器 (DAD) 串联荧光检测器 (FLD) 进行 PAHs 的定性和定量分析^[8]. DAD 检测器波长设定为 254 nm, FLD 检测器激发 (E_x) 和发射 (E_m) 波长条件根据时间而改变, 具体方法参考文献 [10-11]. 色谱柱为 C_{18} (4.6 mm×150 mm), 流动相为乙腈水溶液, 进样量为 20 μ l, 流速为 1 ml/min, 柱温为 30℃. 沉积物中总溶解性碳 (TOC) 含量测定采用重铬酸钾氧化法, 总氮 (TN) 和总磷 (TP) 含量的测定均采用过硫酸盐氧化法^[2].

为了保证实验分析数据的准确性和可靠性, 样品分析的过程中同步设置方法空白实验判定整个实验操作过程中是否有基质的干扰. 方法回收率实验选用经马弗炉焙烧处理过的石英砂代替环境样品, 加入定量的 PAHs 标准化合物, 按照上述同样的预处理方法进行样品处理, 一起分析测定每种化合物的方法回收率. 石英砂为分析纯, 马弗炉 450℃ 焙烧 6 h 后于干燥器内保存. 实验表明, 测定 16 种优先控制 PAHs 的方法回收率为 75.92%~139.53%. 试验中总 PAHs 为 16 种 PAH 同系物的总量. 通过分别添加已知浓度的菲到沉积物和苦草样品中, 测定其菲的回收率分别为 89.65%±3.55% 和 90.27%±2.31%.

1.5 数据处理

沉积物中 PAHs 的降解动力学采用一级反应动力学方程 ($C=C_0 \cdot e^{-kt}$) 进行拟合^[2], 其中, C_0 为 PAH 的初始含量, k 为速率常数, t 为降解时间. PAH 的半衰期 $t_{1/2}$ 的计算: $t_{1/2} = (\ln 2)/k$.

实验数据用 Origin Pro 8.5 软件处理与绘图. 显著性检验采用 IBM SPSS Statistics 19 软件的单因素方差检验 (One way ANOVA, $P<0.05$ 为显著相关), 若方差齐性则采用 LSD 方法进行多重比较检验, 若方差不齐性, 则采用 Dunnett's T3 进行多重比较检验.

2 结果与讨论

2.1 沉积物与苦草的初始理化特征分析

东太湖入湖河道大水港与东太湖湖湾区的沉积物和苦草的初始理化指标如表 1 所示. 东太湖入湖河道大水港沉积物中 PAHs 含量为 70.10±16.40 mg/kg, 显著高于 ($P<0.05$) 湖湾区的 PAHs 含量 (3.68±1.20 mg/kg). 而且大水港沉积物中以高分子量 PAHs 为主, 4~6 环 PAHs 占总 PAHs 比例高达 83%. 同样, 大水港沉积物中 TOC、TN 和 TP 浓度均显著高于 ($P<0.05$) 湖湾区. 此外, 两处沉积物的 Fe (III) 含量较为接近, 但是 Fe (II) 含量有着明显区别, 大水港处 Fe (II) 含量明显高于 ($P<0.05$) 湖湾区, 接近其 2 倍. 表明东太湖入湖河道大水港处沉积物与东太湖湖湾区处沉积物污染程度存在明显差异. 根据沉积物质量评价等级, 大水港沉积物中 PAHs 污染为重度污染, 其含量已超过生态风险区间低值 (4 mg/kg), 该区域内 PAHs 污染可能会对生物产生负面影响, 威胁人类的身体健康^[12-13]. 而东太湖湖湾区 PAHs 污染水平相对较低, 但仍处于中度污

染程度.

表 1 东太湖入湖河道大水港和湖湾区沉积物和苦草的初始属性指标

Tab.1 Initial properties of sediment and *V. natans* in Dashui harbour and the bay of east Lake Taihu

初始属性指标		大水港	湖湾区	显著性分析 (<i>t</i> 检验, <i>P</i> 值)
沉积物	含水率/%	51.93±0.67	55.95±0.64	0.049
	pH	7.02±0.16	7.54±0.18	0.040
	总 PAHs/(mg/kg)	70.10±16.40	3.68±1.20	0.005
	2~3 环 PAHs/(mg/kg)	11.95±3.91	1.15±0.64	0.003
	4~6 环 PAHs (mg/kg)	58.15±13.00	2.53±1.17	0.003
	TOC/%	1.49±0.28	0.60±0.04	0.006
	TN/(g/kg)	7.75±0.95	1.62±0.04	0.008
	TP/(g/kg)	1.63±0.01	0.39±0.01	0
	Fe ³⁺ /(μmol/g)	5.20±1.36	5.36±1.66	0.920
	Fe ²⁺ /(μmol/g)	81.77±6.91	45.31±2.96	0.002
苦草	株高/cm	31.14±9.20	54.09±8.27	0
	总 PAHs/(mg/kg(DW))	30.80±11.18	8.18±3.11	0.051
	2~3 环 PAHs/(mg/kg(DW))	3.21±1.72	1.74±0.85	0.359
	4~6 环 PAHs/(mg/kg(DW))	27.59±12.77	6.44±3.94	0.036

对大水港和湖湾区 2 处采集的苦草研究发现,湖湾区苦草的平均株高和鲜重均要高于大水港苦草. 而从苦草体内富集的总 PAHs 来看,大水港处苦草体内富集的 PAHs 含量远远超过了湖湾区的苦草,接近湖湾区处苦草体内的 4 倍,其中在总 PAHs 中,4~6 环的 PAHs 也占了很大的比重. 可见,在不同污染程度的区域中,苦草均能生长,但是在污染程度相对较高的区域中,生长的苦草其体内富集的 PAHs 含量也较高. 表明沉水植物苦草对 PAHs 具有很好的富集性能. 早先的研究同样表明苦草的根部对菲的富集系数为 0.63~2.85, 且苦草的叶部对菲的富集系数为 0.19~1.62^[4-5].

2.2 东太湖大水港与湖湾区苦草对沉积物中 PAHs 的修复效果

通过设置不同的实验处理组,考察东太湖大水港与湖湾区苦草对沉积物中 PAHs 的修复效果,沉积物中 PAHs 含量随时间的变化曲线如图 2 所示. 在整个修复过程中,种植苦草沉积物处理组与未种植苦草沉积物对照组总 PAHs 含量均有一定程度的降低. 其中,种植苦草沉积物处理组的 PAHs 含量降低程度较为明显. 经过 34 d 的植物修复,东太湖大水港沉积物的总 PAHs 含量由 70.1 mg/kg 降至 26.78 mg/kg,降低了 62%; 而东太湖湖湾区沉积物的总 PAHs 去除率为 42%,PAHs 含量在第 5 天时出现最低值,后续时间基本维持不变. 与未种植苦草的对照组相比较(图 2),2 个种植苦草的沉积物 PAHs 去除率较未种植区域分别提高了 21% 和 14% ($P<0.05$). 此外,为获得未种植苦草的对照组中 PAHs 的降解动力学,对照组中 PAHs 降解时间持续了 53 d. 结果表明,对于 PAHs 高含量和低含量污染的沉积物,苦草均有较好的修复效果,而高浓度沉积物区域的修复效果更为显著. 这种修复效果除了与苦草对 PAHs 的富集作用有关,而且与苦草的根系泌氧造成根际沉积物区域具有较高的氧化还原电位(ORP)以及苦草的根与根际微生物协同作用密切相关^[4-6];已有的研究发现,在有挺水植物菖蒲(*Acorus calamus*)的沉积物的 ORP(149±19 mV)要显著高于未种植植物沉积物(-53±20 mV),且根际沉积物内主要富集了好氧 PAHs 降解菌属(福格斯氏菌 *Vogesella*、假单胞菌 *Pseudomonas*、黄杆菌 *Flavobacterium* 和根瘤菌 *Rhizobium*)^[8]. 此外,植物的根系泌氧可明显提高沉积物中 PAHs 降解菌数至少 1 个数量级^[8]. 与未种植苦草的对照组相比,种植苦草处理组因植物新生有机碳不断输入到沉积物中,沉积物中 PAHs 的生物有效性会明显提高^[2,14,16],改善了沉积物中 PAHs 的修复效果.

2.3 种植苦草的沉积物中不同环数 PAHs 的去除分析

本实验考察了 16 种主要的 PAHs,分别为 2 环:萘;3 环:苊烯、苊、芴、菲、蒽;4 环:荧蒽、芘、苯并(a)蒽、屈;5 环:苯并荧(k)蒽、苯并(b)荧蒽、苯并(a)芘、二苯并(a,h)蒽;6 环:茚并(1,2,3-cd)芘,苯并(g,h,i)芘.

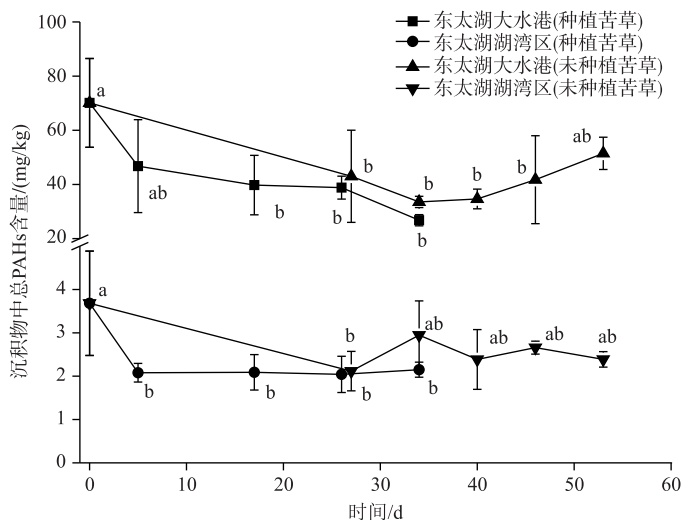


图2 东太湖大水港与湖湾区的苦草对沉积物中PAHs的修复以及沉积物中PAHs的自然降解
(不同小写字母表示差异具有显著性)

Fig.2 The remediation of PAHs-contaminated sediment with planting *V. natans* and natural attenuation of PAHs in sediment in Dashui harbour and the bay of east Lake Taihu (Different small letters refer to significant differences)

东太湖大水港区4~6环PAHs的初始含量较高,分别为 28.84 ± 9.46 、 15.64 ± 1.88 和 13.68 ± 1.77 mg/kg,而在经过34 d的修复后,分别降为 7.89 ± 2.71 、 7.44 ± 3.23 和 6.89 ± 3.03 mg/kg,去除率分别为72.75%、52.37%和49.63%。而沉积物中2环和3环的PAHs初始含量较低,其去除率分别为74.47%和61.06% (图3A)。对于污染程度相对低的东太湖湖湾区(图3B),其沉积物中PAHs的去除主要表现为6环PAHs的去除,去除率高达77.22%。由此可见,苦草对于沉积物中高分子量PAHs有较好的修复效果。这种沉积物中高分子量PAHs的去除主要通过植物的根系分泌物作为共代谢基质实现,植物根系分泌物中的芳香族有机酸可以作为PAHs微生物分解代谢的中间产物^[8,14],这些中间体可以诱导PAHs降解酶的表达或者作为共代谢基质,

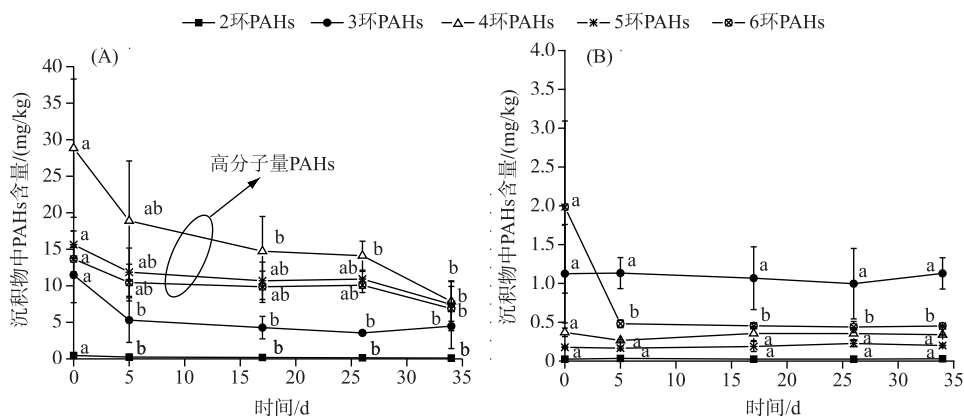


图3 东太湖大水港(A)和湖湾区(B)的苦草对沉积物中不同环PAHs的修复
(不同小写字母表示差异具有显著性)

Fig.3 The remediation of different ring-PAHs in sediment with planting *V. natans* in Dashui harbour (A) and the bay (B) of east Lake Taihu (Different small letters refer to significant differences)

从而促进 PAHs 的生物降解. 此外,植物的内生菌不仅可以促进植物生长,同时可以协同降解有机污染物,对植株体内的污染物也具有代谢功能;且植物内生菌群落与植物种类、植物的不同组织部位以及植物生境类型有关^[15]. 目前,有关沉水植物苦草内生菌的群落结构及分布特征还未见报道.

2.4 沉积物中 PAHs 的降解动力学

沉积物中 PAHs 的降解速率及半衰期可看出,大水港(种植苦草)处理组对 PAHs 的降解速率为 0.024 d⁻¹,半衰期为 28.36 d,而未种植苦草沉积物中 PAHs 的降解速率为 0.007 d⁻¹,半衰期为 95.61 d(表 2). 可见,大水港种植苦草的沉积物中 PAHs 的降解速率明显快于未种植苦草的降解速率,并且半衰期也显著低于未种植苦草的半衰期,PAHs 的降解速率加快了 3 倍左右. 同样在湖湾区,种植苦草的降解速率是未种植苦草的降解速率的 2.15 倍,半衰期是未种植苦草的半衰期的 0.46 倍. 结果表明在高浓度和低浓度的污染环境中,种植苦草均可有效地加快沉积物中 PAHs 的降解速率并且缩短降解周期.

此外,大水港(种植苦草)降解速率是湖湾区(种植苦草)降解速率的 1.65 倍,半衰期是湖湾区(种植苦草)的 0.61 倍,说明苦草在高浓度 PAHs 中的修复效果要明显优于在低浓度中的效果. 表明苦草对沉积物中 PAHs 具有很好的修复潜能,在苦草的耐受限范围内(沉积物中非浓度 80 mg/kg^[4-5]),沉积物污染程度越高,苦草的修复作用更为显著.

通过研究大水港(种植苦草)降解速率可发现,沉积物中 PAHs 的降解速率表现为 3 环 PAHs>4 环 PAHs>5 环 PAHs>6 环 PAHs,表明沉积物中低环 PAHs 更易于降解. 在自然环境中低分子量 PAHs 相对比较容易降解,而高分子量 PAHs 具有更强疏水性、难降解以及持久性特点^[2,16].

表 2 不同处理条件下沉积物中 PAHs 的降解速率及半衰期*

Tab.2 Degradation rate and half-life of PAHs in sediments under different treatment conditions

PAHs	不同处理条件	降解速率/d ⁻¹	半衰期/d	r ²
总 PAHs	大水港(种植苦草)	0.02444	28.36	0.78
	大水港(未种植苦草)	0.00725	95.61	0.63
	湖湾区(种植苦草)	0.01485	46.68	0.65
	湖湾区(未种植苦草)	0.00691	100.31	0.62
3 环 PAHs	大水港(种植苦草)	0.03750	18.48	0.54
4 环 PAHs	大水港(种植苦草)	0.03600	19.25	0.89
	大水港(未种植苦草)	0.01677	41.33	0.80
5 环 PAHs	大水港(种植苦草)	0.01682	41.21	0.75
6 环 PAHs	大水港(种植苦草)	0.01476	46.96	0.69

* 其他处理条件下沉积物中 PAHs 降解曲线采用一级反应动力学方程均无法拟合.

3 结论

1)沉水植物苦草对 PAHs 具有很好的富集潜能,PAHs 污染重的入湖河道大水港处苦草体内富集的 PAHs 含量明显高于湖湾区苦草. 在不同污染程度的 2 个区域中,苦草均能生长,但是湖湾区苦草的平均株高和鲜重均要高于大水港苦草.

2)在不同污染程度的 2 个区域中,苦草对沉积物中 PAHs 均有较好的修复效果,而且在 PAHs 污染重的沉积物区域的修复效果更加显著,尤其表现为高分子量 PAHs 的去除.

3)苦草的种植可以有效地加快沉积物中 PAHs 的降解速率并且缩短降解周期. 因此,沉水植物苦草在污染沉积物的修复方面发挥着重要的作用. 不过,苦草的修复机制有待进一步研究,尤其是苦草植株体内富集的微生物群落对 PAHs 的分解转化是今后研究的重点.

4 参考文献

[1] Tao S, Luo YM, Zhu LZ *et al.* Regional environmental processes of typical trace organic pollutants. *Journal of Environmental Science*, 2006, **26**(1): 168-171. [陶澍, 骆永明, 朱利中等. 典型微量有机污染物的区域环境过程. 环境科学学

- 报, 2006, **26**(1): 168-171.]
- [2] Yan ZS, Jiang HL, Li XH *et al.* Accelerated removal of pyrene and benzo[*a*]pyrene in freshwater sediments with amendment of cyanobacteria-derived organic matter. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, **272**: 66-74.
- [3] Biernacki M, Lovett-Doust J. *Vallisneria americana* (Hydrocharitaceae) as a biomonitor of aquatic ecosystems: comparison of cloned genotypes. *American Journal of Botany*, 1997, **84**(12): 1743-1751.
- [4] Yan ZS, Guo HY, Song TS *et al.* Tolerance and remedial function of rooted submersed macrophyte *Vallisneria spiralis* to phenanthrene in freshwater sediments. *Ecological Engineering*, 2011, **37**(2): 123-127.
- [5] Yan ZS, Hu Y, Jiang HL. Toxicity of phenanthrene in freshwater sediments to the rooted submersed macrophyte *Vallisneria spiralis*. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2011, **87**(2): 129-133.
- [6] Liu HY, Meng FB, Tong YD *et al.* Effect of plant density on phytoremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons contaminated sediments with *Vallisneria spiralis*. *Ecological Engineering*, 2014, **73**(0): 380-385.
- [7] Li XH, Yan ZS, Jiang HL. Effect of direct-current electric field on the growth of submerged macrophyte *Vallisneria natans*. *J Lake Sci*, 2016, **28**(5): 1023-1030. DOI:10.18307/2016.0512. [李晓红, 晏再生, 江和龙. 直流电场对沉水植物苦草(*Vallisneria natans*)生长的影响. 湖泊科学, 2016, **28**(5): 1023-1030.]
- [8] Yan ZS, Jiang HL, Cai HY *et al.* Complex interactions between the macrophyte *Acorus Calamus* and microbial fuel cells during pyrene and benzo[*a*]pyrene degradation in sediments. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 10709.
- [9] Yan ZS, Zhang HC, Wu HF *et al.* Occurrence and removal of polycyclic aromatic hydrocarbons in real textile dyeing wastewater treatment process. *Desalination and Water Treatment*, 2016, **57**(47): 22564-22572.
- [10] Zhao ZH, Zhang L, Cai YJ *et al.* Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) residues in several tissues of edible fishes from the largest freshwater lake in China, Poyang Lake, and associated human health risk assessment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, **104**: 323-331.
- [11] Li QY, Zhao ZH, Jiang Y *et al.* Vertical distribution characteristics of organochlorine pesticides and polycyclic aromatic hydrocarbons in a sedimentary core from Zhouxi Bay, Lake Poyang. *J Lake Sci*, 2016, **28**(4): 765-774. DOI:10.18307/2016.0409. [酃倩玉, 赵中华, 蒋豫等. 鄱阳湖周溪湾沉积物中有机氯农药和多环芳烃的垂直分布特征. 湖泊科学, 2016, **28**(4): 765-774.]
- [12] Baumard P, Budzinski H, Michon Q *et al.* Origin and bioavailability of PAHs in the Mediterranean sea from mussel and sediment records. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1998, **47**(1): 77-90.
- [13] Long ER, Macdonald DD, Smith SL *et al.* Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environmental Management*, 1995, **19**(1): 81-97.
- [14] Rentz JA, Alvarez PJJ, Schnoor JL. Benzo[*a*]pyrene co-metabolism in the presence of plant root extracts and exudates: Implications for phytoremediation. *Environmental Pollution*, 2005, **136**(3): 477-484.
- [15] Yang MZ, Yan ZS, Wu H *et al.* Effects on interactions between aquatic plants and rhizosphere/endophytic microorganism on degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments. *Chemistry & Bioengineering*, 2016, **33**(12): 6-13. [杨明忠, 晏再生, 吴慧芳等. 水生植物与根际/根内微生物相互作用对沉积物中多环芳烃降解的影响. 化学与生物工程, 2016, **33**(12): 6-13.]
- [16] Toyama T, Furukawa T, Maeda N *et al.* Accelerated biodegradation of pyrene and benzo[*a*]pyrene in the *Phragmites australis* rhizosphere by bacteria-root exudate interactions. *Water Research*, 2011, **45**(4): 1629-1638.