

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.05.003

# 污泥干化芦苇床芦苇中多环芳烃的含量分布

崔玉波,孙红杰,冉春秋

(大连民族学院 环境与资源学院,辽宁 大连 116600)

**摘要:**通过现场试验,考查了多环芳烃(PAHs)从污泥向芦苇的转移以及PAHs在芦苇各部位的分布情况。受试芦苇植于污泥干化芦苇床内,芦苇床规格3 m×1 m×1.3 m,其中高度含0.65 m填料层和0.65 m超高。试验进行了3 a,包括2 a的污泥负荷期和1 a的闲置期。2 a负荷期内共进泥8.4 m(含水率99.14%),污泥PAHs含量平均5.69 mg·kg<sup>-1</sup>。原生芦苇茎和叶中的PAHs含量相对较高,达到2.198和2.583 mg·kg<sup>-1</sup>(DW),分别是芦苇根PAHs含量的2.44和2.87倍,且以低环PAHs为主。运行结果表明,受试芦苇对污泥中的PAHs产生了明显的富集作用。运行第2年9、10和11月取污泥干化芦苇床芦苇样品并进行检测,发现芦苇根茎叶内PAHs含量呈逐月升高趋势;第3年11月芦苇根茎叶所含PAHs总量分别为7.642、7.713、7.946 mg·kg<sup>-1</sup>(DW),相对原生芦苇分别提高了8.50、3.52和3.08倍,且以低环PAHs为主,根茎叶低环PAHs含量占PAHs总量的55.14%、56.96%和44.59%。芦苇中PAHs的含量与植物含脂率具有显著的正相关关系,而与芦苇的含水量无关。

**关键词:**富集;多环芳烃;芦苇;污泥干化芦苇床;污泥处理

**中图分类号:**X703 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)05-0013-06

## Distribution of PAHs in *Phragmites australis* in Sludge Drying Reed Bed

Cui Yubo, Sun Hongjie, Ran Chunqiu

(College of Environment and Resources, Dalian Nationalities University, Dalian 116600, Liaoning, P. R. China)

**Abstract:** The transfer of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from sewage sludge to *Phragmites australis* and the distribution of PAHs in *Phragmites australis* were investigated in a field experiment. Tested *phragmites australis* were planted in a sludge drying reed bed (SDRB) with the size of 3 m×1 m×1.3 m (0.65 m media layer and 0.65 m extra height). The experiment lasted three years including two years' sludge loading and one year's resting period. Totally 8.4 meters surplus activated sludge with 99.14% of moisture content was feed into the SDRB during loading time, and raw sludge contained 5.69 mg/kg (DW) of total PAHs. Native *Phragmites australis* contain higher PAHs in the stems and leaves, averaged 2.198 and 2.583 mg/kg (DW) which are 2.44 and 2.87 times of that in the roots, respectively. The results showed that *Phragmites australis* accumulated PAHs from sludge obviously. Lower molecular weight PAHs are the dominant contents in which of *Phragmites australis*. According to the experimental results in September, October and November of the second year, the PAHs contents in the roots, stems and leaves of tested *Phragmites australis* have the trend of increasing with plant growing time; the total PAHs in the roots, stems and leaves are averaged 7.642, 7.713 and 7.946 mg/kg (DW) in November of the third year, which are 8.5, 3.52 and 3.08 times of that in native ones, and also lower

收稿日期:2013-3-12

基金项目:国家自然科学基金(51278088);中央高校基本科研业务费专项(DC12010205)

作者简介:崔玉波(1968-),男,教授,博士,主要从事水污染控制工程研究,(E-mail)cyb@dlnu.edu.cn.

molecular weight PAHs are dominant with the percentages of 55.14%, 56.96% and 44.59%, respectively. PAHs contents in *Phragmites australis* are observed to be significant positive relations with their coarse fat contents and have no relationship with lipid percentages.

**Key words:** accumulation; PAHs, *Phragmites australis*; sludge drying reed bed; sludge treatment

到 2010 年底,中国城镇污水污水处理能力达到 1.22 亿  $\text{m}^3$ ,相应的每年污泥产量近 3 000 万 t(含水率 80%),污泥处理与处置成为业内急待解决的问题。污泥中一方面含有丰富的 N、P、K 和有机质,是良好的肥料资源;另一方面它含有多种污染物,需要妥善处置。尤其是污泥中的难降解有机物质如多环芳烃(PAHs)的存在,已经引起广泛关注。PAHs 具有较强的致癌和致突变性,许多国家都将其列入优先控制污染物的黑名单中。以处理工业废水为主产生的污泥中 PAHs 含量较高,有的甚至达到 2 000  $\text{mg}/\text{kg}$ <sup>[1]</sup>。中国城镇污水处理厂污泥处置土地改良用泥质标准(CH/T 291—2008)中有关 PAHs 的控制标准限值为苯并(a)芘不超过 3  $\text{mg}/\text{kg}$  干污泥,没有 PAHs 总量的限值。但一些发达国家的标准要严格得多,例如丹麦的污泥农用 PAHs 总量标准限值为 3  $\text{mg}/\text{kg}$  干污泥;荷兰规定未污染土壤的 PAHs 含量为 0.02~0.05  $\text{mg}/\text{kg}$  干土壤<sup>[2]</sup>。显然,污泥中 PAHs 的存在引发对其去除技术的研究和需求。

污泥干化芦苇床是利用植于人工湿地中的芦苇对污泥进行脱水 and 稳定化处理的技术,该技术始于欧洲,近年来对其研究和应用呈快速增长之势<sup>[3-5]</sup>。但目前的相关文献中,针对芦苇对污泥所含 PAHs 的去除功能研究不足,本文通过运行 3 a 的污泥干化芦苇床的研究,系统考察芦苇在吸收和转化污泥中 PAHs 所发挥的作用。

## 1 试验装置与方法

### 1.1 试验装置

污泥干化芦苇床系统位于大连开发区污水处理厂,由污泥泵、进泥箱和芦苇床组成。芦苇床规格为 3.0  $\text{m} \times 1.0 \text{ m} \times 1.3 \text{ m}$ ,其中高度由 65 cm 填料层和 65 cm 超高组成,超高部分为污泥积存提供空间。填料层由下至上依次为炉渣 20 cm、砾石 20 cm、粗砂 5 cm、细砂 20 cm。芦苇床底部设直径 20 cm、长 3 m 排水花管,污泥渗滤液经填料层通过排水管排出。排水管沿长 1/3 和 2/3 处设通风管,直接与大气相连。

### 1.2 试验运行概况

试验分为 3 a,第 1 a 为调整期,第 2 a 正常运行,第 3 a 为自然稳定期。

第 1 年五月中旬开始启动,芦苇移植后,经过 25 d 适应性培养,然后按间歇方式布泥。布泥周期为 7 d,进泥量 600 L,进泥时间约半小时。第 1 年共历时 18 个周期,秋季芦苇枯死后停止运行。第 2 年系统从启动到结束共运行了 24 个周期。2 a 期间芦苇床进泥总厚度为 8.4 m,污泥含水率、总悬浮固体(TSS)和挥发性悬浮固体(VSS)浓度平均分别为 99.14%、8.14 g/L 和 7.04 g/L,芦苇床污泥负荷为 41.3  $\text{kg}(\text{TSS})/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

芦苇床进泥的 PAHs 平均含量为 5.69  $\text{mg}/\text{kg}$ ,以低环 PAHs(包括 2~3 环的萘、苊烯、苊、芴、菲、葱、荧葱)为主,占 48.01%;中环 PAHs(包括 4 环的芘、苯并(a)葱、屈、苯并[b]荧葱、苯并[k]荧葱)占 33.14%,高环 PAHs(包括 5~6 环的苯并[a]芘、茚并(1,2,3-cd)芘、二苯并(a,h)葱、苯并(g,h,i)芘)占 18.85%。

第 3 年末芦苇床中污泥 PAHs 含量平均为 1.86  $\text{mg}/\text{kg}$ ,其中低环 PAHs 占 32.43%;中环 PAHs 占 43.63%,高环 PAHs 占 24.12%。

### 1.3 PAHs 检测方法

样品经自然风干,研磨过 100 目筛,称取 1 g 样品于 100 mL 锥形瓶中,加入 2 g 无水硫酸钠和 1 g 铜粉,加入 60 mL 正己烷-二氯甲烷(1:1)混合溶剂,封口,超声萃取 90 min,离心(3 000 r/min)30 min,旋转蒸发后定容至 4 mL,待用。

样品提纯:超声萃取后样品用柱层析方法提纯。称取 2.0 g 硅胶,3.0 g 无水硫酸钠(在 600  $^{\circ}\text{C}$  灼烧 6 h)与少量正己烷于烧杯内制成匀浆,湿法填装层析柱。层析柱下端放入少量脱脂棉做支柱填料,加入 0.3 g 石英(60~80 目,在 130  $^{\circ}\text{C}$  活化 16 h),用 10 mL 正己烷润湿柱子,加入 40 mL(1:1)二氯甲烷、正己烷洗脱样品,将洗脱液旋转蒸发至干,用高纯氮气吹扫定容至 2 mL 样品瓶中,用 GC/MS 以外标法定量测定 PAHs。

GC/MS 条件:GC-2010 型气相色谱/质谱联用仪(日本岛津公司),色谱柱为 SE-54 型高分辨率弹性石英毛细管柱,柱长 30.00 m,内径 0.25 mm,膜厚 0.25  $\mu\text{m}$ 。柱温升温程序:100  $^{\circ}\text{C}$  保持 1 min,以 5  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  升至 280  $^{\circ}\text{C}$ ,保持 30 min。进样量 1  $\mu\text{L}$ 。载气为高纯氮气,柱流速 0.88  $\text{mL}/\text{min}$ ,

尾吹气流速 20 mL/min;柱前压 85.6 kPa;采用分流进样,分流比为 10 : 1;进样口温度 280 °C;检测器温度 280 °C;EI 电离方式,电离能 70 eV。全扫描测定方式的扫描范围为 100~400 amu。

## 2 结果与讨论

### 2.1 原生芦苇中 PAHs 的含量分布

芦苇床运行的第 2 年和第 3 年,分别取处于生长末期的原生芦苇样品,检测其 PAHs 含量,结果见表 1。

表 1 原生芦苇平均 PAHs 含量 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

PAHs 代码	PAHs	平均含量/ $10^{-1}$		
		根	茎	叶
1	NaP(萘)	0.021	0.375	0.195
2	Acy(萘烯)	0.307	1.334	0.464
3	Ace(萘)	0.628	2.038	1.491
4	Fle(芴)	1.760	4.177	1.552
5	Phe(菲)	2.203	4.156	1.570
6	Ant(蒽)	1.294	3.689	4.352
7	Fla(荧蒽)	0.116	1.092	0.845
8	Pyr(苝)	0.225	1.09	1.681
9	BaA(苯并(a)蒽)	0.329	0.445	1.082
10	Chr(屈)	0.146	0.932	5.959
11	BbF(苯并[b]荧蒽)	0.236	0.646	1.685
12	BkF(苯并[k]荧蒽)	0.226	0.268	1.750
13	BaP(苯并[a]苝)	0.059	0.059	0.656
14	IcP(茚并(1,2,3-cd)苝)	0.386	0.400	1.059
15	DaA(二苯并(a,h)蒽)	0.807	0.705	0.652
16	BgP(苯并(g,h,i)苝)	0.247	0.520	0.841
	$\Sigma$ PAHs	8.990	21.930	25.830

原生芦苇 PAHs 含量分布具有如下特征:1) PAHs 总量:叶>茎>根,茎和叶中的 PAHs 含量相对较高,分别是根系的 2.44 和 2.87 倍;2) 芦苇根茎叶所含 PAHs 中三环的 Ace(萘)、Fle(芴)、Phe(菲)、Ant(蒽)含量较高,相对四环以上的成分较少;3) 芦苇茎中二到三环的 PAHs 如 NaP(萘)、Acy(萘烯)、Ace(萘)、Fle(芴)、Phe(菲)明显高于根和叶;而四环以上的 Pyr(苝)、BaA(苯并(a)蒽)、Chr(屈)、BbF(苯并[b]荧蒽)、BkF(苯并[k]荧蒽)、BaP(苯并[a]苝)、IcP(茚并(1,2,3-cd)苝)、BgP(苯并(g,h,i)苝)在芦苇叶中的含量又明显高于根和茎。

### 2.2 污泥干化芦苇床中芦苇 PAHs 的含量与分布

污泥干化芦苇床运行到第 2 年,分别取 9 月、10 月和 11 月月底的芦苇样品,检测其根茎叶所含 PAHs 的分布情况,检测结果见图 1 至图 3。第 3 年 11 月底芦苇样品 PAHs 含量分布如图 4 所示。

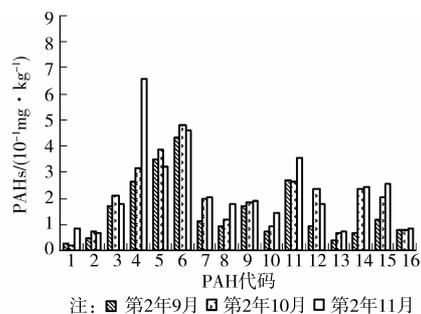


图 1 第 2 年芦苇根 PAHs 含量变化

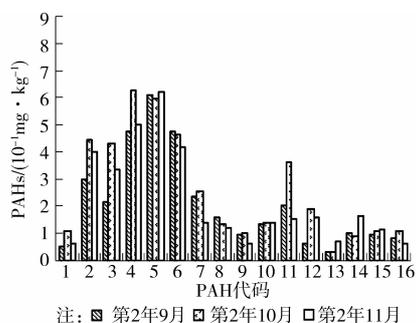


图 2 第 2 年芦苇茎 PAHs 含量变化

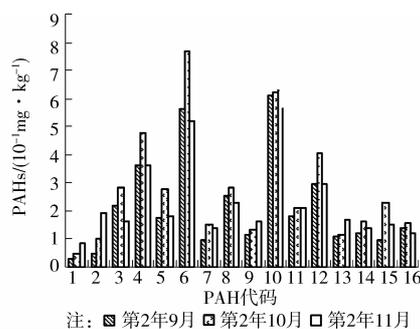


图 3 第 2 年芦苇叶 PAHs 含量变化

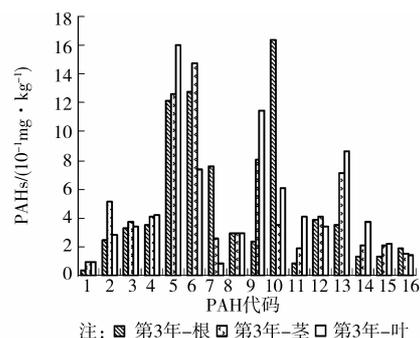


图 4 第 3 年芦苇根茎叶 PAHs 含量变化

污泥干化芦苇床中芦苇各部位 PAHs 总量与原生芦苇对比情况见表 2。

表 2 污泥干化芦苇床中芦苇各部位 PAHs 总量/ $10^{-1}$  ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

部位	第 2 年			第 3 年	原生
	9 月	10 月	11 月	11 月	芦苇
根	24.054	31.616	36.829	76.42	8.99
茎	33.184	41.779	35.278	77.13	21.93
叶	34.126	44.336	37.485	79.46	25.83

宏观上看,2 个芦苇床中的芦苇根茎所含 PAHs 主要为三环烃,另 BbF(苯并[b]荧蒹)的含量相对较高;而芦苇叶中除主要含三环烃外,四环以上的 Pyr(苊)、Chr(屈)、BbF(苯并[b]荧蒹)、BkF(苯并[k]荧蒹)含量较高,尤其富含 Chr(屈)。

处于负荷期第 2 年的芦苇在生长末期,芦苇根系所含 PAHs 随时间逐月增高,11 月份达到最大

值;茎和叶的 PAHs 含量在十月份达到最大值;根茎叶对 PAHs 产生了明显的富集作用。

处于自然稳定期的第 3 年末,芦苇根、茎和叶对 PAHs 的富集较原生芦苇分别提高了 850%、352% 和 308%;芦苇根中含量最高的是 Chr(屈),达 1.64 mg/kg,含量最小的是 NaP(萘),为 0.032 mg/kg。芦苇茎中含量最高的是 Ant(蒽),达 1.473 mg/kg,含量最小的是 NaP(萘),为 0.098 mg/kg。芦苇叶中含量最高的是 Phe(菲),达 1.596 mg/kg,含量最小的是 Fla(荧蒹),为 0.087 mg/kg。

### 2.3 污泥干化芦苇床芦苇中 PAHs 的组成

表 3 列出了芦苇不同部位各种多环芳烃含量在总量中的比例。可见,芦苇根茎叶中不同多环芳烃的含量差异很大。芦苇根中从 0.42%(萘)到 21.46%(屈),芦苇茎中从 1.27%(萘)到 19.1%(蒽),芦苇叶中从 1.09%(荧蒹)到 20.1%(菲)。

表 3 芦苇中 PAH 平均百分组成

PAHs 代码	PAHs	占总量的百分比/%			PAHs 代码	PAHs	占总量的百分比/%		
		根	茎	叶			根	茎	叶
1	NaP(萘)	0.419	1.271	1.195	9	BaA(苯并(a)蒽)	3.062	10.398	14.448
2	Acy(苊烯)	3.141	6.742	3.473	10	Chr(屈)	21.460	4.538	7.576
3	Ace(苊)	4.344	4.901	4.203	11	BbF(苯并[b]荧蒹)	1.125	2.489	5.109
4	Fle(芴)	4.528	5.238	5.235	12	BkF(苯并[k]荧蒹)	4.973	5.303	4.291
5	Phe(菲)	15.977	16.362	20.086	13	BaP(苯并[a]芘)	4.580	9.205	10.949
6	Ant(蒽)	16.736	19.098	9.300	14	IcP(茚并(1,2,3-cd)芘)	1.649	2.671	4.732
7	Fla(荧蒹)	9.997	3.345	1.094	15	DaA(二苯并(a,h)蒽)	1.714	2.684	2.832
8	Pyr(苊)	3.873	3.838	3.637	16	BgP(苯并(g,h,i)芘)	2.421	1.919	1.837

芦苇中高、中、低环 PAHs 百分组成列于表 4。

表 4 芦苇中高、中、低环 PAHs 百分组成

多环芳烃	占总量的百分比/%		
	根	茎	叶
低环	55.14	56.96	44.59
中环	34.49	26.57	35.06
高环	10.36	16.48	20.35

芦苇根、茎、叶中所含 PAHs 的量具有低环>中环>高环特征;尤其是根和茎中低环多环芳烃占绝对优势,含量都超过 50%;而高环多环芳烃在根、茎、叶中的含量呈升高趋势,即叶>茎>根。

低环多环芳烃在芦苇茎中的含量最高,达 56.96%,在叶中的含量最低,为 44.59%;中环多环

芳烃在芦苇叶中的含量最高,达 35.06%,在茎中的含量最低,为 26.57%;高环多环芳烃在芦苇叶中的含量最高,达 20.35%,在根中的含量最低,为 10.36%。

### 2.4 芦苇粗脂肪和水分含量与 PAHs 含量的关系

粗脂肪和水分是植物体内的重要物质,了解植物粗脂肪和水分含量对多环芳烃的影响是分析污染物在植物体内迁移的重要依据。将芦苇根、茎、叶中的粗脂肪和水分含量分别与多环芳烃含量做关系图,如图 5、6 所示。

可见,芦苇组织中多环芳烃含量与粗脂肪含量和水分含量之间的相关性存在显著差异。芦苇各部位多环芳烃总量与粗脂肪含量具有显著的正相关关系,线性相关系数达到 0.999 6( $R^2$ ),即粗脂肪含量越高,多环芳烃含量越大。而多环芳烃总量与植物水分含量没有明显的相关性。

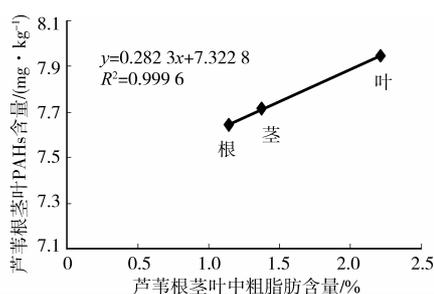


图5 芦苇粗脂肪含量与多环芳烃含量关系

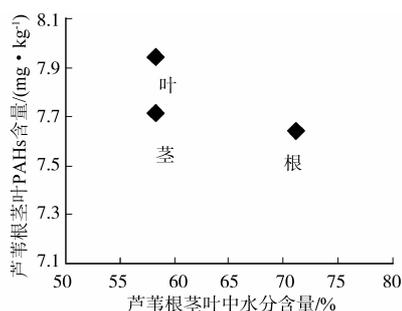


图6 芦苇水分含量与多环芳烃含量关系

## 2.5 讨论

植物在全球 PAHs 循环中起到重要作用, PAHs 在植物体内的吸收途径主要有:通过根系从土壤中吸收,然后再从根系向茎叶转移;大气中挥发性有机物在根系和幼苗上的吸附;从污染土壤或降尘中吸附在表皮,或通过吸收进行渗透进入植物体内<sup>[6-7]</sup>。

原生芦苇所含 PAHs 可能通过根系从土壤中进入,也可以从大气通过气相和颗粒沉积经叶片吸收。叶片中的高 PAHs 含量暗示着这些 PAHs 来源于大气中的气相和颗粒沉积,大气沉降成为植物叶子中 PAHs 的主要输入途径;而根系 PAHs 的低浓度源于其生存土壤的低 PAHs 含量<sup>[8]</sup>。有研究表明,污染源排放到大气中的 PAHs,其中(44±18)%被植物吸收、净化。从检测结果分析,暴露于大气中的芦苇茎叶起到了直接吸收大气中 PAHs 的作用,且以吸收低环的 Ace(萘)、Fle(芴)、Phe(菲)、Ant(蒽)为主。

植物修复是利用植物原位处理污染土壤、水、污泥的一种方法,植物可通过吸收、固定、挥发污染物,并能释放一些分泌物、酶以利于降解有机污染物,并可刺激根区微生物的活性来进行 PAHs 的污染修复<sup>[9]</sup>。植物对 PAHs 的修复作用因植物种类不同而效果不同,例如田间试验中玉米、高粱对 PAHs 的降解效果显著的好于三叶草和紫花苜蓿<sup>[10]</sup>。但针对污泥干化芦苇床中污泥 PAHs 的去除效果和芦苇的

作用仅见于 Cui 等人的初步报道<sup>[11]</sup>。Muratova 等人用盆栽试验研究了芦苇和紫花苜蓿根际修复 PAH 污染土壤,两年后,紫花苜蓿和芦苇根际处理 PAH 去除率分别为 74.5%和 68.7%,该研究主要针对根际微生物展开研究,并未提及芦苇的功效<sup>[12]</sup>。

Ren 等报道了茺蓼、菲、奈对水萍的光诱导性毒害,认为随着苯环的增加其毒害症状趋于明显<sup>[13]</sup>。而本研究中,5.69 mg/kg 的进泥 PAHs 含量并未造成对芦苇生长的不良影响,经过 3 年的稳定化处理,污泥中的 PAHs 含量降到 1.89 mg/kg,其中除了生物降解作用外,芦苇各部位的 PAHs 含量明显增加,说明了芦苇起到不可忽视的作用。

植物体内 PAHs 的含量与植物生长环境中 PAHs 的含量、植物的品种有关;同一植物不同部位的 PAHs 含量也不同;生长在工厂附近的植物,根部 PAHs 总量甚至超过 12.3 mg/kg,远大于内源产生的 PAHs<sup>[14]</sup>。本研究中,第 3 年末,污泥干化芦苇床内芦苇根、茎和叶对 PAHs 的富集较原生芦苇分别提高了 8.50、3.52 和 3.08 倍,显然在芦苇根系发生了明显的 PAHs 富集,并向芦苇的地上部分传递。

Gao and Zhu 研究了不同植物根系对 PAHs 的吸收,发现植物对 PAHs 的富集作用与土壤 PAHs 含量和植物构成有关<sup>[15]</sup>。大多研究表明较高的植物吸收 PAHs 能力较差,2~3 环的 PAHs 从根系向上的输送的可能性较大<sup>[16]</sup>,植物体内的高环 PAHs 主要源于大气向叶子的沉降<sup>[17]</sup>。从研究的结果看,芦苇根茎叶中的 PAHs 以低环为主,中环次之,高环最低,与上述研究结论一致。而 Guo 等对白洋淀的相关研究认为,芦苇根系和叶子对四环 PAHs 的吸收较其他环 PAHs 高,尤其是根系跟容易富集 PAHs,可能是由于根系的水分含量较茎叶高所致<sup>[8]</sup>。关于芦苇根系富集 PAHs 的结论与本研究一致,但如图 6 所示,研究中没有发现芦苇根茎叶水分含量与 PAHs 含量之间的直接相关性。而芦苇各部位的粗脂肪含量与 PAHs 含量之间线性相关度高达 0.9996( $R^2$ ),这可能和 PAHs 属亲脂类有机物有关<sup>[15]</sup>。

一旦 PAHs 被吸收,植物可以通过木质化作用在新的植物中储藏它们的残片,可以代谢和矿化它们为水和二氧化碳,还可以使它们挥发<sup>[18]</sup>。污泥中的 PAHs 在芦苇体内各部位主要以富集作用为主。

## 3 结论

1)污泥干化芦苇床中的芦苇能够有效富集污泥中的多环芳烃(PAHs),起到稳定污泥中难降解有

机物的作用。

2) 经 2 a 的污泥负荷期和 1 a 的闲置期, 污泥干化芦苇床中的芦苇根茎叶所含 PAHs 显著增加, 分别达到 7.642、7.713、7.946 mg/kg(DW), 是原生芦苇根茎叶 PAHs 含量的 8.50、3.52 和 3.08 倍, 且以低环 PAHs 为主, 分别占根茎叶 PAHs 总量的 55.14%、56.96% 和 44.59%。

3) 污泥干化芦苇床芦苇中的 PAHs 含量与其粗脂肪含量具有显著的正相关关系, 而与植物含水量无关。

#### 参考文献:

- [1] 莫测辉, 蔡全英, 吴启堂, 等. 我国一些城市污泥中多环芳烃(PAHs)的研究[J]. 环境科学学报, 2001, 21(5): 613-618.  
Mo C H, Cai Q Y, Wu Q T, et al. A study of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in municipal sludge of China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2001, 21(5): 613-618.
- [2] 宋雪英, 孙丽娜, 杨晓波, 等. 辽河流域表层土壤多环芳烃污染现状初步研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(1): 216-220.  
Song X Y, Sun L N, Yang X B, et al. Contamination status of polycyclic aromatic hydrocarbon in top soils of Liao River basin [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(1): 216-220.
- [3] Uggetti E, Ferrer I, Llorns E, et al. Sludge treatment wetlands: A review on the state of the art [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(9): 2905-2912.
- [4] Cui Y B, Sun H J, Yang M L, et al. Plant growth for sewage sludge ecological stabilization[J]. Journal of Residuals Science & Technology, 2012, 9(1): 47-53.
- [5] 崔玉波, 孙红杰, 杨明蕾, 等. 剩余污泥生态稳定化研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(4): 150-155.  
Cui Y B, Sun H J, Yang M L, et al. Ecological Stabilization for Sewage Sludge [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(4): 150-155.
- [6] Lada K, Pavel T. The uptake of persistent organic pollutants by plants[J]. Central European Journal of Biology, 2011, 6(2): 223-235.
- [7] Tao Y Q, Zhang S Z, Zhu Y G, et al. Uptake and acropetal translocation of polycyclic aromatic hydrocarbons by wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in field-contaminated soil [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(10): 3556-3560.
- [8] Guo W, Pei Y S, Yan Z F, et al. Assessment on the distribution and partitioning characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Lake Baiyangdian, a shallow freshwater lake in China [J]. Journal of Environmental Monitoring, 2011, 13(3): 681-688.
- [9] Tang C S, Sun W H H, Toma M. Evaluation of agriculture-based phytoremediation in pacific island ecosystems using trisector planters [J]. International Journal of Phytoremediation, 2004, 6(1): 17-33.
- [10] Andreotti G, Plata N, Porta A, et al. Phytoremediation of hydrocarbons-polluted agricultural soils [J]. Phytoremediation, Wetlands and Sediments, 2001, 6(5): 41-51.
- [11] Muratova A, Hubner T, Tischer S, et al. Plant-rhizosphere-microflora association during phytoremediation of PAH-contaminated soil [J]. International Journal of Phytoremediation, 2003, 5(2): 137-151.
- [12] Ren L, Zeiler L F, Dixon D G, et al. Photoinduced effects of polycyclic aromatic hydrocarbons on Brassica napus (Canola) during germination and early seedling development [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 1996, 33(1): 73-80.
- [13] Lee H K, Wright G J, Swallows W H. The identification of sources of PAH by using concentration ratios of total PAH and Pb [J]. International Journal of Environmental Studies, 1990, 36(4): 273-277.
- [14] Gao Y Z, Zhu L Z. Plant uptake, accumulation and translocation of phenanthrene and pyrene in soils [J]. Chemosphere, 2004, 55(9): 1169-1178.
- [15] Wild S R, Jines K C. Polynuclear aromatic hydrocarbons uptake by carrots grown in sludge amended soil [J]. Journal of Environmental Quality, 1992, 21(2): 217-225.
- [16] Smith K E C, Jones K C. Particles and vegetation, implications for the transfer of particle-bound organic contaminants to vegetation [J]. The Science of the Total Environment, 2004, 246(2/3): 207-236.
- [17] 丁克强, 骆永明. 多环芳烃污染土壤的生物修复[J]. 土壤, 2001, 33(4): 169-176.  
Jing K M, Luo Y M. Bioremediation for polluted soils by polycyclic aromatic hydrocarbon [J]. Soil, 2001, 33(4): 169-176.

(编辑 胡玲)