

典型持久性有机污染物在翅碱蓬中的分布特征

高世珍^{1,2}, 赵兴茹^{2*}, 崔世茂¹, 甘志芬², 焦立新², 刘录三², 雷坤², 郑丙辉²

(1. 内蒙古农业大学农学院, 呼和浩特 010018; 2. 中国环境科学研究院国家环境保护河口与海岸带环境重点实验室, 北京 100012)

摘要: 碱蓬是潮间带的常见优势种群, 为了解其在持久性有机污染物从陆域向海洋迁移中所起的作用, 利用 GC-MS 研究了东营和营口潮间带盐沼植物翅碱蓬不同器官及根系土中有机氯农药 (OCPs)、多环芳烃 (PAHs)、十溴联苯醚 (BDE209) 和多氯联苯 (PCBs) 的含量和分布特征。结果表明, 4 类持久性有机污染物在翅碱蓬中的污染水平依次为 $\sum \text{PAHs} > \sum \text{OCPs} > \text{BDE209} > \sum \text{PCBs}$ (96 ~ 1 506 ng/g、14 ~ 577 ng/g、1.8 ~ 33 ng/g 和 399 ~ 2 161 pg/g)。营口潮间带沉积物中 OCPs、PAHs 和 PCBs 的污染水平高于东营, 但这 3 类污染物在两地潮间带翅碱蓬叶子中的含量水平相当。OCPs 在两地翅碱蓬各器官中的分布相同, 即茎 > 根 > 叶, PAHs 和 PCBs 2 种污染物受根系土中有机质含量的影响, 在翅碱蓬器官中呈现不同的分布。BDE209 在东营潮间带的污染水平 (19.7 ng/g) 高于营口 (2.36 ng/g), 在碱蓬器官中呈现不同分布。

关键词: 翅碱蓬; 有机氯农药; 多环芳烃; 多氯联苯; 十溴联苯醚; 持久性有机污染物

中图分类号: X132 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)10-2456-06

Distribution Characteristics of the Typical Persistent Organic Pollutants (POPs) in *Suaeda heteroptera*

GAO Shi-zhen^{1,2}, ZHAO Xing-ru², CUI Shi-mao¹, GAN Zhi-fen², JIAO Li-xin², LIU Lu-san², LEI Kun², ZHENG Bing-hui²

(1. College of Agronomy, Inner Mongolia Agriculture University, Huhhot 010018, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Estuary and Coastal Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: The *Suaeda heteroptera* are widely distributed in intertidal zone, in order to investigate its function in preventing the transfer of the contaminants from land to sea, the levels and the distribution characteristics of organochlorine pesticides (OCPs), polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), decabromodiphenyl ether (BDE209), and polychlorinated biphenyls (PCBs) in *Suaeda heteroptera* and their associated soils were studied with GC-MS. The results indicated that the levels of these pollutants in *Suaeda heteroptera* were in the following order: $\sum \text{PAHs} > \sum \text{OCPs} > \text{BDE209} > \sum \text{PCBs}$ (96-1 506 ng/g, 14-577 ng/g, 1.8-33 ng/g, and 399-2 161 pg/g, respectively). The levels of OCPs, PAHs, and PCBs in sediments from Yingkou intertidal zone were higher than that from Dongying intertidal zone, however, these pollutants in *Suaeda heteroptera* leaves were approximately equal, respectively. The distribution of OCPs in *Suaeda heteroptera* appeared in the following order: stem > root > leaf, and the distribution of PAHs and PCBs in *Suaeda heteroptera* from Dongying intertidal zone were different from Yingkou intertidal zone, due to the difference of the organic matter content in sediments. The level of BDE209 in sediment from Dongying intertidal zone (19.7 ng/g) was higher than that from Yingkou intertidal zone (2.36 ng/g), and appeared different distribution in *Suaeda heteroptera* from the two intertidal zones.

Key words: *Suaeda heteroptera*; organochlorine pesticides (OCPs); polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); polychlorinated biphenyls (PCBs); decabromodiphenyl ether (BDE209); persistent organic pollutants (POPs)

持久性有机污染物 (persistent organic pollutants, POPs) 是一类在环境中难降解、在生物体内难代谢, 具有很强的亲脂性, 可以在食物链中富集, 能够通过蒸发、冷凝等过程远距离传输的污染物, 这类污染物毒性高, 即使在微量水平也能对生态环境和人体健康产生显著不良影响^[1,2]。我国曾生产过滴滴涕、毒杀芬、六氯苯、氯丹、七氯和灭蚁灵等 6 种杀虫剂, 并且多家生产企业分布在环渤海区域的周边省市。其中仅滴滴涕 (DDT) 的累计使用量就达约 40 万 t, 占全世界总用量的 20%^[3]。多环

芳烃 (PAHs) 是一类广泛存在于环境中的本底值含量较高的持久性有机污染物, 土壤和地下水中多环芳烃污染主要来源于石油的开采、冶炼、使用、运输过程和泄漏事故, 以及含油废水的排放、污水灌溉, 各种石油制品的挥发、不完全燃烧物飘落等^[4]。

收稿日期: 2009-12-01; 修订日期: 2010-01-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (20877073); 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2007CB407306); 环保公益性行业科研专项项目 (200709020)

作者简介: 高世珍 (1981 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境科学, E-mail: gaoshzh@yahoo.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: zhaoxr@craes.org.cn

十溴联苯醚(BDE209)是一种添加型高效阻燃剂,由于含溴量高、热稳定性好、添加量少而被广泛用于高分子塑料的阻燃,在众多溴系阻燃剂中其使用量最大.多氯联苯(PCBs)曾广泛用作电力设备(如变压器、电容器等)的绝缘介质、油漆、塑料及无碳复写纸的添加剂等.

潮间带作为陆地与海洋之间的一条通道,经受着陆源物质的输入输出过程.近年来随着沿海地区工农业的快速发展,大量有机污染物通过降尘、地表径流、降雨等方式进入河流或海洋^[5-7].翅碱蓬作为滨海盐碱地、滨海河口地区的常见优势种群,为海滨湿地的保护和生态修复提供了植物物种资源.关于翅碱蓬对有机污染物的吸收和富集,国内外还鲜见相关报道.为了解其在持久性有机污染物从陆域向海洋迁移中所起的作用,本实验以渤海湾辽宁营口和山东东营潮间带的翅碱蓬(*Suaeda heteroptera*)为研究对象,分析了典型持久性有机污染物 OCPs、PAHs、BDE209 和 PCBs 在其体内及根系土中的含量及分布特征,探讨了翅碱蓬对潮间带沉积物中这几类 POPs 的吸收和富集.

1 材料与方法

1.1 样品采集

碱蓬是一年生草本聚盐植物,植物学分类为藜科(Chenopodiaceae)碱蓬属(*Suaeda forsk. exscop.*),主要生长于海滨、湖边、荒漠等处的盐碱荒地,是一种典型的盐碱地指示植物^[8,9].我国共有碱蓬属植物 20 种及 1 个变种,目前对碱蓬属植物的研究主要集中在灰绿碱蓬(*Suaeda glaucabunge*)、盐地碱蓬[*S. salsa*(L.)Pall]和翅碱蓬(*Suaeda heteroptera*).碱蓬具有抗逆性强、繁殖容易、种子寿命长等特性,盐地碱蓬能耐 3% 的盐度,可在海水中生长,可以作为环境改良作物^[10-12].本研究于 2008 年 9 月份花期采集翅碱蓬样品,采用 GPS 定位系统在辽宁营口辽河入海口潮间带(N40°40'38.7",E122°09'32.0")和山东东营潮间带(N37°24.505',E118°55.313')按棋盘格方式采集翅碱蓬样品.采样、贮存、运输以及其他各个要素均按海洋调查规范^[13]执行.

土壤的有机质含量按常规分析方法测定^[14],东营土壤有机质含量为 0.23%,营口土壤有机质含量为 1.2%.

1.2 试剂与仪器

试剂:OCPs 混标购自 Cambridge Isotope Laboratories, Inc. PAHs 标样购自美国 Supelco 公司.

PBDEs ¹³C 标记添加内标(EO-5277)、¹³C 标记的注射标(EO-5275)、用于最初精密度实验和实验中精密度实验的标准溶液(EO-5278),均购自 Cambridge Isotope Laboratories, Inc. PCBs ¹³C 标记添加内标(EC-4977)、¹³C 标记的注射标(EC-4979),购自 Cambridge Isotope Laboratories, Inc. 实验所用有机溶剂正己烷、二氯甲烷为农残级,购自 Fisher(Fair Lawn, USA),壬烷购自 Sigma(St. Louis, USA).浓硫酸、氢氧化钠、硝酸银,以及用于玻璃仪器洗涤的溶剂如甲醇、二氯甲烷、丙酮为分析纯(北京化工厂生产);无水硫酸钠(分析纯,北京化工厂生产)、层析柱用氧化铝(100~200 目,上海五四化学试剂厂)、弗罗里硅土(60~100 目, U. S. Silica corp, Berkeley Springs, WV)、层析柱用硅胶(100~200 目,青岛海洋化工厂)、10% 硝酸银硅胶、22% 酸性硅胶、44% 酸性硅胶、33% 氢氧化钠硅胶、和 5% 失活硅胶等物料的制备见文献[15].

仪器:微型植物粉碎机(FZ102,天津市泰斯特仪器有限公司)、加速溶剂萃取机(ASE300, U. S. DIONEX)、气相色谱-质谱联用仪(Agilent 7890GC/5975 MS).

1.3 样品的前处理与仪器分析方法

翅碱蓬的根、茎、叶分别用自来水冲洗干净,用去离子水冲洗 3 遍,遮光阴干后用植物粉碎机粉碎,用干净的铝箔纸分别包好封存.翅碱蓬根系土冷冻干燥后,研磨,过 45 目筛,用干净的铝箔纸包好封存.处理好的样品分析前于 -20℃ 冷冻贮存.

1.3.1 样品的提取与净化

OCPs 的提取和净化:准确称取 2.000 g 样品,与 5.0 g 左右的无水硫酸钠充分混合均匀,用正己烷与二氯甲烷混合溶剂(体积比 1/1)加速溶剂提取(ASE300,温度为 100℃,压力为 1.03×10^7 Pa,静态萃取时间为 5 min、循环 2 次).提取液浓缩后用 5% 失活硅胶柱净化. PAHs 的提取和净化:精确称取 2.000 g 样品与 5.0 g 左右的无水硫酸钠充分混合均匀,提取方法同 OCPs.提取液浓缩后用活化硅胶柱净化. PBDEs 和 PCBs 的提取和净化:精确称取 2.000 g 样品与 5.0 g 左右的无水硫酸钠充分混合均匀,加入 1 ng PCB 内标 EC-4977 和 1 ng PBDE 内标 EO-5277 平衡 12 h,提取方法同 OCPs.提取液浓缩后用多层硅胶柱净化分离^[15]后,用碱性氧化铝柱进一步分离净化 PCBs,用弗罗里土柱进一步分离净化 PBDEs.洗脱液浓缩后用氮气吹扫进行微量浓缩至 20 μ L,分别加入注射标,进行 GC-MS 仪器分析.

1.3.2 仪器分析

OCPs 和 PAHs 采用 Aglient 7890GC/5975MS 进行定性和定量分析,色谱柱:BD-5 ms (30 m × 250 μm × 0.25 μm), EI-SIM 测定方式,离子源温度 230℃,四极杆温度 150℃,不分流进样.进样口温度和升温程序,OCPs:进样口温度 225℃,接口温度 280℃,载气流速 0.8 mL/min;升温程序:起始温度 70℃ (保留 1 min),然后以 4℃/min 升温至 280℃ (保留 5 min).PAHs:进样口温度为 250℃,接口温度为 290℃,载气流速 1 mL/min;升温程序:起始温度 60℃ (保留 2 min),然后以 10℃/min 升温至 120℃,再以 4℃/min 升温至 290℃ (保留 10 min).

PBDEs 的仪器测试条件为:Aglient 7890GC/5975MS,色谱柱:DB-5 ms (15 m × 250 μm × 0.25 μm), NCI-SIM 测定方式,离子源温度 150℃,四极杆温度 150℃.高压不分流进样 (3.45 × 10⁵ Pa),进样口温度为 275℃,接口温度为 320℃,载气流速为 1.5 mL/min.升温程序:起始温度 80℃,以 10℃/min 升温至 200℃,再以 20℃/min 升温至 300℃ (保留 15 min).

PCBs 的仪器分析由中国科学院生态环境研究中心二噁英实验室完成,采用同位素稀释高分辨气相色谱-质谱 (Auto-Spec) 进行测定,仪器条件见文献 [16].

1.3.3 质量控制和质量保证

采用空白实验、初始实验、实验中的精密度实验和回收率进行实验的质量控制和质量保证.为了控制提取及分离操作过程中可能带来的污染,进行样品分析前,进行方法空白实验,实验过程中每 10 个样品增加 1 个方法空白,并以信噪比的 3 倍作为方法的检出限,OCPs、PAHs、PBDEs 和 PCBs 的方法检出限分别为 0.02 ~ 1.97、0.02 ~ 0.2、0.2 ~ 1.5 和 1.0 ~ 10 pg/g.初始精密度实验和回收率:取翅碱蓬植物和根系土样品,进行初始精密度和回收率实验.称取 4 份样品 (每份约 2 g),分别加入 4 ng 的目标化合物平衡 12 h,按照上述相应的方法进行提取、净化和测定.OCPs、PAHs、PBDEs 和 PCBs 的加标回收率分别为 65% ~ 110%、72% ~ 96%、60% ~ 105% 和 60% ~ 110%,标准相对偏差分别为 <10%、<5%、<12% 和 <15%.实验进行中的精密度实验:实验过程中,每 10 个样品为一批次,进行实验中的精密度实验,即取一份用于进行初始精密度实验和回收率的样品同时分析测定,和初始精密度的偏差 <20%.在样品前处理过程中,要用铝箔包裹器皿以防 BDE209 的分解.

2 结果与讨论

东营和营口潮间带翅碱蓬各组织器官和根系土中 PAHs、OCPs、PCBs 和 PBDEs 的测定结果列于表 1 和表 2.

表 1 翅碱蓬植物器官和根系土中 PAHs、OCPs、PCBs 和 PBDEs 的含量¹⁾/ng·g⁻¹

Table 1 Levels of PAHs, OCPs, PCBs, and PBDEs in *Suaeda heteroptera* organs /ng·g⁻¹

地点	POPs	韧皮	木质	叶	茎	根	根系土
东营	PBDE209	11.2	7.55	32.5	21.4	11.4	19.7
	PCBs	1.3	0.47	1.03	0.98	2.16	0.4
	PAHs	—	—	1 004	1 329	1 506	96
	OCPs	—	—	158	577	447	13.9
营口	PBDE209	—	—	3.49	1.75	8.6	2.36
	PCBs	—	—	1.32	0.95	1.13	1.68
	PAHs	—	—	944	656	889	451
	OCPs	—	—	155	330	259	38.8

1) $\sum$ PCBs:三氯代至十氯代 PCB 的含量 Σ ; $\sum$ PAHs 为萘、苊、芴、菲、蒽、荧蒽、芘、苯并[a]蒽、蒽、茚、苯并[b]蒽、苯并[k]荧蒽、苯并[a]芘、二苯并[a,h]蒽、苯并[ghi]芘、茚并[1,2,3-c,d]芘之和; $\sum$ OCPs 为 α -HCH、 β -HCH、 γ -HCH、 δ -HCH、六氯苯、七氯、 p,p' -DDE、 γ -氯丹、 α -硫丹、狄氏剂、 β -硫丹、 o,p' -DDT、 p,p' -DDT、 p,p' -DDD、异狄氏剂、硫丹硫酸酯、异狄氏酮、甲氧滴滴涕、环氧七氯和 α -氯丹之和

2.1 OCPs 在翅碱蓬植物器官和根系土中的含量与分布特征

在测定的 22 种 OCPs 中,六氯苯、DDTs 和 HCHs 的检出率为 100%.表 1 表明 OCPs 在营口潮

间带的沉积物中 (39 ng/g,干重) 高于东营 (14 ng/g,干重). $\sum$ OCPs 在翅碱蓬各器官中的含量高于根系土,其分布表现为茎 > 根 > 叶 > 土.东营和营口两地潮间带的翅碱蓬根对 OCPs 的富集倍数分

表 2 潮间带翅碱蓬植物器官和根系土中 POPs 的指纹分布含量/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ Table 2 Patterns of POPs in *Suaeda heteroptera* organs / $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

POPs	东营翅碱蓬				营口翅碱蓬			
	叶	茎	根	根系土	叶	茎	根	根系土
六氯苯	16	32	12	3.47	27	25	9.39	14.7
<i>p,p'</i> -DDE	4.86	23.3	8.47	0.31	3.75	11.5	7.28	1.05
<i>o,p'</i> -DDT	74.5	314	264	1.6	64.5	1356	126	2.77
<i>p,p'</i> -DDT	1.34	19.1	17.8	0.32	4.91	20.7	18.5	1.73
<i>p,p'</i> -DDD	2.17	6.6	7.4	0.39	1.55	1.23	1.43	0.62
OCPs $\sum$ DDTs	82.85	362.57	297.43	2.62	74.68	168.69	152.95	6.17
α -HCH	1.75	1.22	2.71	0.73	5.79	0.95	1.12	0.39
β -HCH	27.4	84.5	24.8	1.4	7.92	89.7	75.2	11.2
γ -HCH	0.29	2.16	4.83	1.38	3.51	0.73	1.02	0.14
δ -HCH	1.21	2.26	4.07	0.39	3.23	1.85	1.29	0.29
$\sum$ HCHs	30.6	90.11	36.4	3.9	20.46	93.25	78.6	11.99
3-PCB	0.047	0.038	0.057	0.016	0.131	0.057	0.047	0.03
4-PCB	0.282	0.606	0.476	0.273	0.646	0.504	0.563	0.477
5-PCB	0.173	0.118	1.571	0.03	0.209	0.123	0.116	0.206
6-PCB	0.105	0.113	0.016	0.026	0.124	0.085	0.088	0.12
三环	738	1912	1085	59	652	982	706	149
四环	238	712	404	32	261	308	167	196
五环	24	29	14.3	4.17	27.4	19.5	12.8	86
六环	3.19	5.01	2.85	1.01	3.99	3.06	2.46	19.7

别为 32 倍和 7 倍. 这可能与潮间带沉积物中有机质的含量有关, 东营潮间带沉积物中的有机质含量 (0.23%) 低于营口潮间带 (1.2%), 而有机质对污染物的吸附作用不利于植物对 OCPs 的吸收. Chiou 等^[17] 研究也发现, 生长于沙土 (有机质含量 1.4%) 上的作物 (萝卜、胡萝卜) 中狄氏剂的含量明显高于生长于黏土 (有机质含量 66.5%) 上的作物.

从表 2 可以看出, $\sum$ DDTs 和 $\sum$ HCHs 在翅碱蓬中的分布表现为茎 > 根 > 叶 > 根系土; 东营翅碱蓬对 $\sum$ DDTs 和 $\sum$ HCHs 的富集倍数高于营口翅碱蓬. 测定结果表明, 两潮间带沉积物中检测到的滴滴涕类农药残留低于六六六, 而翅碱蓬各器官中检测到的滴滴涕类的含量高于六六六, 表明翅碱蓬对滴滴涕类农药的富集高于六六六. 这是由于滴滴涕的 K_{ow} 值高于六六六的 K_{ow} 值, 即脂溶性高的污染物易于被植物富集. 研究结果还表明, 虽然营口潮间带沉积物中 DDT 的浓度为东营的 2.4 倍, 但在翅碱蓬叶子中的含量只有 0.9 倍, 接近相等. 这可能是沉积物中有机质的含量和翅碱蓬叶片组成共同影响所造成的结果. 一般研究认为, 土壤中有机污染物进入植物体主要有 2 种途径^[18]: ① 通过根部吸收并随蒸腾流沿木质部向地上部分迁移; ② 挥发至空气, 再通过气态扩散或颗粒态沉降被植物叶片吸收^[19]. 由此碱蓬植物中的含量不能反映其生长的沉积物中的污染水平.

沉积物中 β -HCH 是 HCH 的主要存在形态. 这可能是由于 HCH 的各异构体的含量及理化性质的不同造成了它们在土壤中残留量的差异. 在六六六商品中含有 65% ~ 70% α -HCH、7% ~ 10% β -HCH、14% ~ 15% γ -HCH、7% δ -HCH 以及其它的异构体. 其中, γ -HCH 易被土壤微生物所降解, 并通过光化学反应转化为 α -HCH^[20], 并且大量的 α -HCH 可以转化为 β -HCH; 另外由于 β -HCH 的分子结构中所有氯原子位于分子的赤道短轴上, 使得其水溶性和挥发性都非常低^[21,22], 稳定性高, 不易被生物降解. (*p,p'*-DDE + *p,p'*-DDD)/*p,p'*-DDT 的比值可用来监测环境中是否有新输入的 DDT^[23], 比值 > 1 表明滴滴涕无新输入, 比值 < 1 则表明现阶段有新的滴滴涕输入. 在本研究中, 两地根系土中 (*p,p'*-DDE + *p,p'*-DDD) 与 *p,p'*-DDT 的比值分别为 2.3 (东营) 和 0.94 (营口), 表明近期东营潮间带没有新输入的 DDT 而营口潮间带有新的 DDT 污染. 工业滴滴涕中 *o,p'*-DDT/*p,p'*-DDT 的比值为 0.2 ~ 0.3, 在三氯杀螨醇中为 1.3 ~ 9.3 甚至更高^[24]. 两地根系土中 *o,p'*-DDT/*p,p'*-DDT 分别在 5.0 和 1.6 左右, 说明三氯杀螨醇是两地潮间带 DDT 的重要来源.

2.2 PAHs 在翅碱蓬植物器官和根系土中的含量与分布特征

营口潮间带沉积物中 PAHs 污染水平 (451 ng/g) 高于东营 (96 ng/g), 但在两地的碱蓬叶子中

的含量基本相等, $\sum$ PAHs 在东营翅碱蓬中的分布表现为根 > 茎 > 叶 > 根系土, 营口翅碱蓬中的分布表现为叶 > 根 > 茎 > 根系土(表 1). 翅碱蓬富集 PAHs 的现象和 DDT 相似, 受沉积物中有机质含量和植物本身特性的共同影响, 相对于营口潮间带, 东营潮间带沉积物中有机质含量低, PAHs 的污染水平低, 但翅碱蓬植物体内的 PAHs 的含量高于营口, 并且在叶子中含量基本相等. 从而说明翅碱蓬从沉积物中吸收 PAHs 是通过根部和叶片共同吸收, 并且翅碱蓬植物中的 PAHs 含量和沉积物中的 PAHs 没有相关性.

在测定的 16 种多环芳烃中菲的含量最高, 东营和营口翅碱蓬根对菲的富集倍数最高, 说明根部对菲的吸收和迁移速率比较快, 与 Wild 等^[25] 研究菲和蒽在小麦和玉米根部的迁移过程结果一致. 由图 1 可以看出各样品中 3 环 PAHs 占 $\sum$ PAHs 的比例最高, 其次是 4 环 PAHs; 翅碱蓬各器官中 5 环和 6 环 PAHs 所占比例较低, 但叶中 5 ~ 6 环 PAHs 占 $\sum$ PAHs 的比例高于茎和根. 说明低环 PAHs 容易在翅碱蓬中富集, 高环 PAHs 较稳定不 $\dot{\bar{u}}$ 翅碱蓬各器官中运输转移, 叶吸附的高环 PAHs 很难向茎运输.

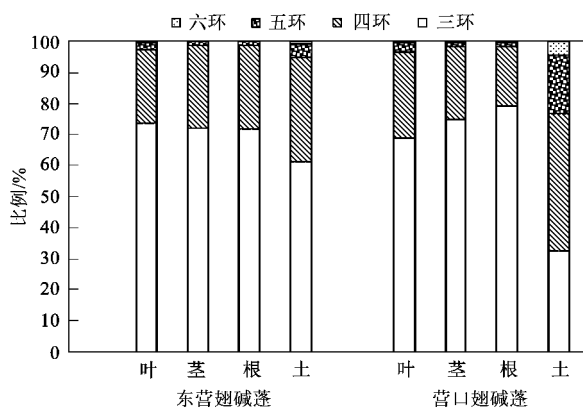


图 1 东营和营口翅碱蓬各器官中不同环数 PAHs 的比例

Fig. 1 Compositions of PAHs in the different organs of *Suaeda heteroptera* from Dongying and Yingkou

2.3 PCBs 在翅碱蓬植物器官和根系土中的含量与分布特征

由表 1 可知, 营口潮间带的沉积物中 PCBs 的污染水平(1 676 pg/g)是东营(399 pg/g)的 4.2 倍, 东营翅碱蓬中 $\sum$ PCBs 的分布为根 > 韧皮 > 叶, 茎 > 木质 > 根系土, 而在营口翅碱蓬中的分布为根系土 > 叶 > 根 > 茎(表 1). 潮间带沉积物中有

机质和 PCBs 污染水平低的东营, 翅碱蓬各器官中 PCBs 的含量高于根系土, 并且根中最高; 而在潮间带沉积物中有机质和 PCBs 污染水平高的营口, 翅碱蓬各器官中 PCBs 的含量低于根系土, 根中 PCBs 的含量比东营翅碱蓬根中的低; 两地翅碱蓬茎中 PCBs 基本相等. 由以上结果可以看出, 影响翅碱蓬对 PCBs 的富集吸收因素有沉积物中的有机质和污染物的水平、翅碱蓬的植物特性和土壤中有有机污染物进入植物体的途径^[18,19] 有关.

三至六氯代的 PCBs 同类物中, 东营潮间带沉积物中的 PCBs 以四氯代为主, 营口以四氯和五氯代的 PCBs 为主(表 2). 三氯代的 PCBs 在两地翅碱蓬叶片中的浓度高于根系土, 并且与根系土中的含量呈正相关, 而在根和茎中的差别不大; 三氯代 PCBs 可能从沉积物挥发至空气中再被叶片吸收进入植物体内的. 四氯代的 PCBs 在两地碱蓬组织器官中的分布相似, 叶片中的含量和其根系土中水平相当, 两地翅碱蓬根和茎中的含量接近; 四氯代的 PCBs 可能通过根部运输和叶片吸收进入翅碱蓬植物体内. 五氯代的 PCBs 在两地翅碱蓬中的分布不同, 沉积物中有机质含量低的东营潮间带, 翅碱蓬各器官中的含量高于其根系土, 根中含量最高; 沉积物中有机质含量高的营口潮间带, 叶片中的含量和其根系土中的相当. 以上现象说明有机污染物的相对分子质量和分子结构影响植物的吸收行为, 而土壤有机质含量是影响植物吸收有机污染物的重要因素^[26].

2.4 PBDEs 在翅碱蓬植物器官和根系土中的含量与分布特征

东营潮间带 BDE209(19.7 ng/g)的污染高于营口潮间带(2.4 ng/g), 东营翅碱蓬中 BDE209 的分布为叶 > 茎 > 根系土 > 根、韧皮 > 木质, 而营口翅碱蓬中的分布为根 > 叶 > 根系土 > 茎(表 1). 两地碱蓬叶中的含量高于根系土中的含量, 并和其根系土中的污染水平呈正相关, 富集倍数在 1.5 倍左右; 说明翅碱蓬中的 BDE209 主要来自大气的传输, 并与翅碱蓬叶、茎韧皮部的气孔和表皮等结构有关^[27]. 大量研究表明, 挥发半挥发性有机污染物在植物叶片和空气之间的分配与其辛醇-气分配系数(K_{oa})密切相关^[28-30].

3 结论

(1)持久性有机污染物 PAHs、OCPs 和 PCBs 在营口潮间带的污染水平高于东营潮间带, PBDEs 在营口潮间带的污染水平低于东营潮间带, 污染水平

依次为 PAHs > OCPs > PBDEs > PCBs。潮间带沉积物中有机质对翅碱蓬吸收这 4 类污染物具有重要作用,沉积物中有机质的含量和污染物本身的性质决定着翅碱蓬对污染物的吸收方式。

(2)在测定的 22 种 OCPs 中,翅碱蓬对 DDTs 具有较高的富集能力。翅碱蓬对 PAHs 的吸收,受沉积物中有机质的作用,低环 PAHs 容易在植物中富集,高环 PAHs 较难迁移不利于植物吸收。在不同氯代的 PCBs 中,四氯代的 PCBs 容易在根系土和翅碱蓬各组织器官中达到平衡。

(3)两地翅碱蓬的叶片组织中 PAHs、OCPs 和 PCBs 的水平基本接近,与其根系土中的污染水平没有相关性,这可能与翅碱蓬叶子的特性有关。PBDEs 具有和 PAHs、OCPs、PCBs 等 3 类污染物不同的分布特征,翅碱蓬中的 PBDEs 主要来自于大气传输,叶子中的含量和其根系土中的含量呈正相关。

参考文献:

- [1] Younes M. Specific issues in health risk assessment of endocrine disrupting chemicals and international activities [J]. *Chemosphere*, 1999, **39**: 1253-1257.
- [2] Oberdorster E, Cheek A O. Gender benders at the beach: endocrine disruption in marine and estuarine organisms [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2000, **20**: 23-36.
- [3] 黄俊,余刚,钱易. 我国的持久性有机污染物问题与研究对策 [J]. *环境保护*, 2001, **29**(11): 3-7.
- [4] 宋玉芳,常士俊,李利,等. 污灌土壤中多环芳烃的积累与动态变化研究[J]. *应用生态学报*, 1997, **8**: 93-98.
- [5] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco H A, *et al.* Human domination of earth's ecosystem [J]. *Science*, 1997, **25**: 494-499.
- [6] Sanger D M, Holland A F, Scott G I. Tidal creek and salt marsh sediments in South Carolina coastal estuaries: II. Distribution of organic contaminants [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1999, **37**: 458-471.
- [7] Purell R J, Taplin B K, McGovern D G, *et al.* Organic contaminant distributions in sediments, polychaetes (*Nereis virens*) and American lobster (*Homarus americanus*) from a laboratory food chain experiment [J]. *Marine Environmental Research*, 2000, **49**: 19-36.
- [8] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志 [M]. (第二十五卷:第二分册). 北京:科学出版社, 1979. 115-135.
- [9] 邵秋玲,李玉娟. 盐地碱蓬开发前景广阔 [J]. *植物杂志*, 1998, **3**: 12.
- [10] Glenn E P. Halophytes for the treatment of saline aquaculture effluent [J]. *Aquaculture*, 1999, **175**: 255-268.
- [11] Beltran J M. Irrigation with saline water: benefits and environmental impact [J]. *Agricultural Water Management*, 1999, **40**: 183-194.
- [12] Growth M S. Water use and salt uptake of four halophytes irrigated with highly saline water [J]. *Journal of Arid Environments*, 1996, **32**: 141-159.
- [13] 国家海洋局. 海洋调查规范 [S]. 北京:海洋出版社, 1995.
- [14] 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. 497-499.
- [15] 赵兴茹. 卤代持久性有机污染物在非洲爪蟾体内的富集代谢及台州污染区居民暴露风险的初步研究 [D]. 北京:中国科学院化学研究所, 2007.
- [16] Zhao X R, Zheng M H, Liang L N, *et al.* Assessment of PCBs and PCDD/Fs along the Chinese Bohai Sea coastline using mollusks as Bioindicators [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2005, **49**: 178-185.
- [17] Chiou C T, Sheng G Y, Manes M A. partition-limited model for the plant uptake of organic contaminants from soil and water [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**: 1437-1444.
- [18] Collins C, Fryer M, Grosso A. Plant uptake of non-ionic organic chemicals [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**: 45-52.
- [19] Paterson S, Mackay D, Tam D, *et al.* Uptake of organic chemicals by plants: a review of processes, correlations and models [J]. *Chemosphere*, 1990, **21**: 297-331.
- [20] Wenzel K D, Manz M, Hubert A, *et al.* Fate of POPs (DDX, HCHs, PCBs) in upper soil layers of pine forests [J]. *Science of the Total Environment*, 2002, **286**: 143-154.
- [21] Willett K L, Ulrich E M, Hites R A. Differential toxicity and environmental fates of hexachlorocyclohexane isomers [J]. *Environmental Science and Technology*, 1998, **32**(15): 2197-2207.
- [22] Manz M, Wenzel K D, Dietze U, *et al.* Persistent organic pollutants in agricultural soils in central Germany [J]. *Science of the Total Environment*, 2001, **277**: 187-198.
- [23] Qiu X H, Zhu T, Yao B, *et al.* Contribution of dicofol to the current DDT pollution in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(12): 4385-4390.
- [24] Qiu X H, Zhu T, Li J, *et al.* Organochlorine pesticides in the air around the Taihu Lake, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(5): 1368-1374.
- [25] Wild E, Dent J, Thomas G O, *et al.* Direct observation of organic Contaminant uptake, storage, and metabolism within plant roots [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**: 3695-3702.
- [26] 沈德中. 污染土壤的植物修复 [J]. *生态学杂志*, 1998, **17**: 59-64.
- [27] Schreiber L, Schonherr J. Uptake of organic chemicals in conifer needles: surface adsorption and permeability of cuticles [J]. *Environmental Science & Technology*, 1992, **26**: 153-159.
- [28] Tolls J, McLachlan M S. Partitioning of semivolatile organic compounds between air and *Lolium multiflorum* (wheat grass) [J]. *Environmental Science & Technology*, 1994, **28**: 159-166.
- [29] Hank H, Umlauf G, McLachlan M S. Uptake of gaseous DDE in spruce needles [J]. *Environmental Science & Technology*, 1994, **28**: 2372-2379.
- [30] Hung H, Thomas G O, Jones K C, *et al.* Grass-air exchange of polychlorinated biphenyls [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**: 4066-4073.