

p,p'-DDT 在黄河兰州段沉积物上的吸附/解吸特性及影响因素研究

杨志群, 姚焕炬, 任 婷, 成 刚, 高 宏

(兰州大学资源环境学院 西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要:采用批量平衡实验,研究了黄河兰州段沉积物对 p,p'-DDT 的吸附/解吸特性,并考察了环境因素温度、pH 值、沉积物粒度等对吸附的影响。结果表明,p,p'-DDT 在黄河兰州段沉积物上的吸附在 24 h 内可以充分达到平衡。吸附过程是非线性的,Freundlich 模型可以较好地描述吸附行为,分配作用和表面吸附作用同时存在;解吸过程存在明显滞后性,即解吸要比吸附困难。正交结果表明吸附质浓度和吸附剂浓度对 p,p'-DDT 在沉积物上的吸附量有显著影响,而温度、pH 值、有机质含量、沉积物粒度影响不显著。

关键词:黄河;沉积物;p,p'-DDT;吸附;影响因素

中图分类号:X592 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)01-0174-06

Characteristics and Effect Factors for the Sorption and Desorption of p,p'-DDT on Sediment of the Yellow River in Lanzhou

YANG Zhi-qun, YAO Huan-ju, REN Ting, CHENG Gang, GAO Hong

(College of Resource and Environment, Lanzhou University, Key Laboratory of Western China's Environmental Systems of Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: To study the characteristics of sorption and desorption is significantly for the environmental behavior and fate of hydrophobic organic contaminants. In this paper, the batch isotherm experiments were performed to study the characteristics and effect factors for the sorption and desorption of p,p'-DDT on sediment of the Yellow River in Lanzhou. The effect of environmental factors on the sorption of p,p'-DDT such as water temperature, pH value, particle sizes in sediments were investigated, respectively. Experimental results demonstrated that the sorption of p,p'-DDT in the sediments of the Yellow River in Lanzhou could be completely balanced in 24 h. The sorption isotherm was non-linear and fitted with the form of the Freundlich equation at experimental condition, which suggested that both adsorption and partition occurred in the sorption process of p,p'-DDT at the same time. The desorption process of p,p'-DDT had an obvious hysteresis, and it was difficult for desorption than sorption. Furthermore, the affected degrees of different environmental factors were different for the sorption. The result of orthogonal experiment indicated that the sorption amount of p,p'-DDT was influenced by the initial concentrations of sorbate and sorbent obviously, sorption amount of p,p'-DDT exhibited an increased trend with the initial concentration of sorbate and decreased trend with the concentration of sorbent, but no other significantly affected factors were obvious including such as water temperature, pH value, content of organic matter, ionic strength.

Keywords: Yellow River; sediment; p,p'-DDT; sorption; effect factors

有机氯农药 p,p'-DDT, 化学名为 2,2-双(4-氯苯基)-1,1,1-三氯乙烷(2,2-bis(p-Chlorophenyl)-1,1,1-trichloroethane), 是一种典型的持久性有机污

染物(persistent organic pollutants, POPs), 曾在世界范围内大量使用, 因其具有环境持久性、生物富集性、生殖毒性, 至今仍严重威胁着人类的健康^[1]。有机污染物与土壤、沉积物和水体中固体悬浮物等介质之间的吸附、解吸、生物转化等行为强烈影响其在环境中的迁移和最终命运, 同时影响着环境质量标准的确立和污染修复的彻底性^[2]。目前, 国内外学者对各大河流、湖泊沉积物对有机污染物的吸附/解吸行为已做了深入

收稿日期: 2009-05-26

基金项目: 甘肃省自然科学基金(0803RJZA085)

作者简介: 杨志群(1984—), 女, 重庆人, 硕士研究生, 研究方向为干旱区有机污染机制。E-mail: yang_zhi_qun@hotmail.com

通讯作者: 高 宏 E-mail: honggao@lzu.edu.cn

的阐述^[3-6],但是对有机氯农药在典型多沙河流的吸附解吸特性的研究相对较少,而且综合考虑吸附影响因素的研究更少。沉积物是有机污染物的重要归宿之一,而黄河是世界上含沙量最高的河流,因此,黄河沉积物对有机污染物的吸附作用是黄河中污染物环境行为及归趋研究的重要部分。黄河沉积物与其他河流相比,有粒径差别大、有机质含量低等特点^[7],导致有机污染物的环境行为与其他河流相比有差异。本文选取 p,p'-DDT 为研究对象,对其在黄河兰州段沉积物上的吸附/解吸特性进行了研究,并利用正交设计实验系统地考察了环境因素对吸附的影响,该研究可为了解有机氯农药在黄河水环境中的迁移、转化及生态风险提供基础研究资料,为沉积物质量标准的制定和污染修复措施的选择提供科学依据和参考。

1 材料与方法

1.1 仪器和试剂

SP3420 气相色谱仪 (⁶³Ni 电子捕获检测器), SHA-B 多功能水浴恒温振荡器 (江苏正基仪器有限公司), RE-52A 旋转蒸发器 (上海亚荣生化仪器厂), TDZ5-WS 多管架自动平衡离心机 (长沙湘仪离心机仪器有限公司), PB-10 型 pH 计 (北京赛多利斯仪器系统有限公司), X 射线衍射仪 (XRD); p,p'-DDT (纯度 98.5%, 购自德国 Dr.Ehrenstorfer 公司), 2,4,5,6-四氯间二甲苯 (TMX, 200 μg·mL⁻¹, 溶剂为甲醇, 美国 SUPELCO 公司生产)。

1.2 沉积物样品

沉积物样品于 2008 年 11 月 9 日采自黄河兰州段上游相对清洁的新城桥断面,在河流左、右两处采集表层沉积物 (采样深度为 0~20 cm)。去除其中的石块、贝壳等杂物,自然风干,用陶瓷研钵研磨后,分别过 60 目 (250 μm)、100 目 (150 μm)、230 目 (63 μm)、325 目 (43 μm) 筛后,于冰箱中贮存备用。

用 30% 过氧化氢溶液浸泡沉积物样 24 h 去除有机质,再用蒸馏水洗涤,经抽滤自然风干,获得去除有机质样^[8]。用去除有机质样配制含 10% 腐植酸的沉积物样备用。有机质含量大小顺序为去除有机质样<沉积物原样<加腐植酸样,用于有机质对吸附的影响实验 (正交实验)。

1.3 实验方法

1.3.1 吸附实验

称取一定量分析纯 p,p'-DDT 配成 100 mg·L⁻¹ 的甲醇贮备液,于冰箱保存。吸附实验前用配比为

250 mg·L⁻¹ CaCl₂、100 mg·L⁻¹ NaN₃ 的背景溶液稀释成不同浓度的实验溶液 (甲醇的体积比均<0.5%^[9]),其中:氯化钙作为主要的矿物成分;叠氮钠作抑菌剂,避免微生物对 p,p'-DDT 的降解。

吸附动力学实验:p,p'-DDT 的初始浓度为 10 μg·L⁻¹,吸附剂浓度为 1 g·L⁻¹,在 20℃±0.5℃下恒温振荡,分别在 0.5、1、1.5、2、2.5、3.5、4.5、5.5、6.5、7.5、9.5、13、24、27、30 h 的时候,取出锥形瓶静置离心,经二氯甲烷萃取,浓缩定容进气相色谱测定 p,p'-DDT 的含量。

吸附等温线实验:p,p'-DDT 的初始浓度分别为 1、2、5、10、20、50 μg·L⁻¹,吸附剂为过 100 目沉积物,浓度为 1 g·L⁻¹,每组 2 个平行样。分别在温度为 20℃±0.5℃和 30℃±0.5℃的条件下恒温振荡 24 h。平衡后,取出静置 30 min,放入离心机于 4 000 r·min⁻¹ 离心 10 min。用移液管移取 10 mL 上清液,用 10 mL 二氯甲烷萃取 3 次,收集萃取液在旋转蒸发仪浓缩至尽干,加 10 mL 正己烷浓缩,最后定容至 1 mL,加内标进气相色谱测定。

解吸等温线实验:吸附实验完成后,向存有吸附剂的具塞磨口锥形瓶移入 50 mL 不含 p,p'-DDT 的背景溶液,继续在 20℃±0.5℃和 30℃±0.5℃的条件下恒温振荡 24 h。达到平衡后,取出静置、离心,方法同吸附实验。

因素影响实验:由于吸附受到吸附质浓度、吸附剂浓度、pH 值、离子交换量、有机质含量等因素的影响不一,所以本实验采用正交设计 (正交设计助手 II 专业版 V3.1) 方法,选取如表 4 所示的 7 因素 3 水平,用 L₁₈(3-7) 正交表安排实验,共完成 18 个不同因素、不同水平的组合实验。每个实验做 3 个平行,以考察实验的准确度。

1.3.2 空白实验

在做吸附/解吸实验时,同时做吸附剂空白实验和吸附质空白实验。扣除实验过程中吸附质的溶出、挥发、玻璃仪器的吸附以及生物降解等因素对实验结果的影响。用差减法计算 p,p'-DDT 在沉积物上的吸附量。

p,p'-DDT 浓度的测定采用气相色谱法。色谱条件为:中国科学院兰州化物所生产 AT 农残 II 色谱柱 (柱长 30 m,内径 0.25 mm);电子捕获检测器 (放射源为 ⁶³Ni);进样口温度 250℃,检测器温度 280℃,柱温 250℃;载气为高纯氮气,流速 2.0 mL·min⁻¹;分流进样,分流比为 15:1,进样量为 1 μL。内标法峰面积定

量(内标为TMX)。

2 结果与讨论

2.1 沉积物理化性质

用重铬酸钾法对沉积物样的有机质含量进行了测定^[10],沉积物的有机质含量为0.47%,结果表明,黄河兰州段天然沉积物的有机质含量较低。沉积物样品的pH值为8.42,阳离子交换容量(CEC)为4.57 mmol·100 g⁻¹沉积物。X射线衍射仪得出沉积物样品的矿物组成有石英、方解石、白云母、纳长石、碳酸钙等。

2.2 p,p'-DDT在沉积物上的吸附速率研究

吸附平衡时间的确定是绘制吸附等温线的关键,不同的化合物在不同的沉积物上达到吸附平衡的时间是不同的,图1描述了p,p'-DDT在黄河沉积物上单位吸附量随时间的变化情况。由图可以看出,吸附分为快吸附阶段、解吸附阶段和慢吸附阶段,沉积物对p,p'-DDT的吸附量在4.5 h内,水体沉积物上的吸附量随时间迅速增加,随后6~8 h内又有缓慢下降。这是因为吸附质快吸附过程之后,有一个解吸附阶段,在完成吸附和解吸过程中,达到最低能态时,浓度会出现与文献[11]的结果类似的波动。最终在15~30 h之间可以达到吸附平衡并趋于稳定。为确保能充分达到吸附平衡,后续实验中的吸附解吸平衡时间确定为24 h。

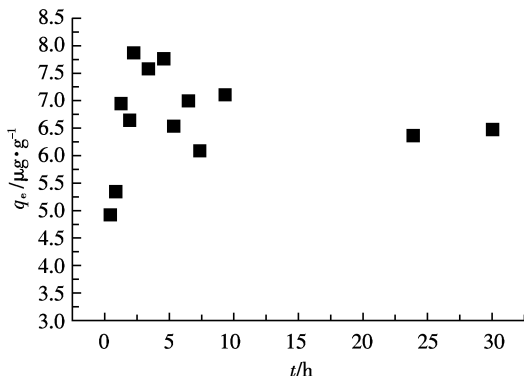


图1 沉积物对p,p'-DDT的吸附速率曲线

Figure 1 Sorption rate curve for p,p'-DDT on sediment

2.3 p,p'-DDT在沉积物上的吸附/解吸等温线

沉积物对p,p'-DDT的吸附/解吸等温线如图2所示。从吸附/解吸曲线看,随着液相p,p'-DDT浓度的增大,单位吸附剂上的吸附量逐渐增大。在本实验条件下(浓度为1~50 μg·L⁻¹),吸附都未趋于饱和。通常,有机物在沉积物上的吸附等温线主要有3种^[12]:

Henry 吸附等温方程: $q_e = K_d C_e + b$

Freundlich 吸附等温方程: $q_e = K_f C_e^n$

Langmuir 吸附等温方程: $q_e = q_m K_d C_e / (1 + K_d C_e)$

式中: q_e 为p,p'-DDT在沉积物中的吸附量,μg·g⁻¹; C_e 为p,p'-DDT的平衡质量浓度,μg·mL⁻¹; K_d 为分配系数,mL·g⁻¹; b 为常数; K_f 为吸附作用强度,mL·g⁻¹; n 为吸附指数; q_m 为饱和吸附量,μg·g⁻¹; K_a 为表面吸附亲和性常数,mL·μg⁻¹。

本文分别用这3种吸附模型对吸附/解吸等温线模拟,得到各等温式的参数及相关系数,如表1所示。从模型的相关程度上分析,无论是吸附还是解吸过程,3种模型都能较好地反映吸附质的吸附特征,表明表面吸附和分配吸附同时存在,不过Freundlich吸附等温方程拟合最好,这种非线性的吸附特性可能与沉积物的异质性有关^[12]。

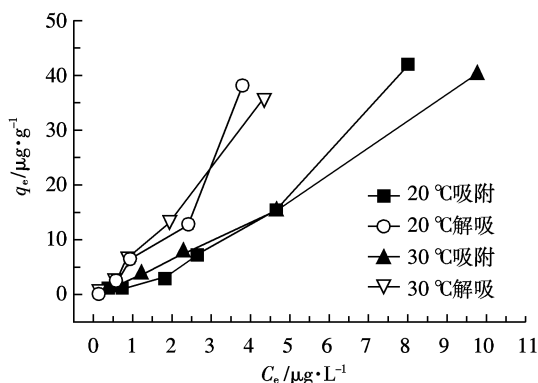


图2 p,p'-DDT在沉积物上的吸附解吸等温线(20 °C、30 °C)

Figure 2 Sorption and desorption isotherm of p,p'-DDT on sediment(20 °C,30 °C)

众所周知,化合物的理化性质对吸附作用亦有一定的影响,该影响表现为吸附过程中吸附热(ΔH)的大小。因此,本文利用公式(1)对p,p'-DDT的吸附热进行计算^[13]。

$$\Delta H(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}) = 2.303R \left(\frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \right) \lg(C_{e1}/C_{e2}) \times 4.186 \quad (1)$$

式中: R 为气体常数; T 为吸附过程中的绝对温度,K; C_{e1} 、 C_{e2} 为某一吸附量下对应的平衡溶液浓度。

随着温度升高,一方面会使物理吸附减弱,使吸附量降低;一方面增大化学吸附量。由计算结果可知,当 C_e 小于5 μg·L⁻¹时,p,p'-DDT的吸附热数值较大(90~240 kJ·mol⁻¹),和化学反应热相近,即30 °C时p,p'-DDT的吸附量大于20 °C时的吸附量,化学吸附占主导地位;当 C_e 大于5 μg·L⁻¹时,随着温度的升

表 1 p,p'-DDT 的吸附解吸等温线特征
Table 1 The character of sorption isotherm of p,p'-DDT

温度/℃		Henry		Freundlich			Langmuir		
		<i>r</i>	<i>k_a</i> /mL·g ⁻¹	<i>r</i>	<i>k_f</i> /mL·g ⁻¹	<i>n</i>	<i>r</i>	<i>k_a</i> /mL·μg ⁻¹	<i>q_m</i> /μg·g ⁻¹
吸附	20	0.976 7	5.389 4	0.992 8	1.926 2	1.398 4	0.985 1	0.152 7	9.398 5
	30	0.995 4	4.134 5	0.999 1	3.120 3	1.084 2	0.999 3	0.052 9	53.763 4
解吸	20	0.959 8	9.631 9	0.989 1	5.214 3	1.365 9	0.994 7	0.335 1	8.319 5
	30	0.997 6	8.388 7	0.996 2	6.416 5	1.199 2	0.980 2	0.375 7	10.638 3

高,p,p'-DDT 的吸附量减少,物理吸附为主。但是,在实际黄河水-沉积物体系中,p,p'-DDT 的浓度很低(0.08 μg·g⁻¹)。因此,黄河沉积物对 p,p'-DDT 的表面吸附作用是以化学吸附为主。

2.4 p,p'-DDT 在沉积物上解吸滞后现象

p,p'-DDT 在沉积物上的吸附等温线和解吸等温线均不重合(图 2),解吸过程的分配系数明显大于吸附过程的分配系数,说明解吸存在滞后性。通常可以采用滞后性指数表征吸附-解吸的滞后性^[14],目前有基于吸附浓度的滞后性指数、基于 Freundlich 方程参数的滞后性指数以及基于吸附-解吸等温线斜率的滞后性指数。本文采用文献[15]定义的迟滞系数 *HI* 描述这种滞后性,公式如下:

$$HI=\frac{qD_e-qS_e}{qS_e}|T,C_e \tag{2}$$

式中:*T*、*C_e* 分别表示恒定的温度和吸附质在液相的平衡浓度;*qD_e*、*qS_e* 分别指在一定的温度和浓度条件下,吸附和解吸过程中,吸附质在沉积物上的浓度。

本文计算了 20℃和 30℃下,*C_e* 分别为 1、2、3 μg·L⁻¹ 时在 p,p'-DDT 的滞后指数(表 2)。由此可以得出,液相平衡浓度越高,滞后指数降低,滞后性逐渐减弱,这一趋势与文献报道结果相符^[12];且随着温度的升高,滞后指数约有降低,利于 p,p'-DDT 从沉积物上解吸出来。引起解吸滞后现象的原因可能有:

①吸附质的疏水特性,以及吸附剂的高度异质性,使得吸附质在吸附剂中发生了锁定,吸附质较难被解吸。

②吸附质在吸附剂上的吸附属于化学吸附,即吸附到固相的化合物发生了物理化学的重排,并改变了

表 2 沉积物对不同浓度下 p,p'-DDT 解吸迟滞系数 *HI*
Table 2 Hysteresis index of desorption of p,p'-DDT in sediment at different concentrations

浓度/μg·L ⁻¹	1	2	3
20℃	8.477 2	1.660 0	1.249 9
30℃	1.591 9	1.254 0	1.169 6

吸附剂的结构,使之难以解吸到液相中^[16]。

2.5 各个因素对 p,p'-DDT 在沉积物上吸附的影响

由于吸附的影响因素很多,各个影响因素所起的权重不一样,本研究设计了正交实验,结果如表 3。对结果进行分析可知,7 个因素的影响程度依次为吸附剂浓度>吸附质浓度>钙离子强度>pH 值>粒度>温

表 3 沉积物对 p,p'-DDT 吸附的正交实验方案及结果
Table 3 Plan and results orthogonal experiment of sorption for p,p'-DDT on sediment

序号	温度/℃	吸附质浓度/μg·L ⁻¹	粒度/μm	吸附剂浓度/g·L ⁻¹	钙离子强度/mg·L ⁻¹	pH 值	吸附剂类型	<i>q_e</i> /μg·g ⁻¹
1	20	10	<43	1	100	a	A	6.482 9
2	20	20	43~63	5	250	b	B	3.426 4
3	20	50	>63	10	500	c	C	4.863 2
4	30	10	<43	5	250	c	C	1.767 4
5	30	20	43~63	10	500	a	A	1.752 4
6	30	50	>63	1	100	b	B	38.992 9
7	40	10	43~63	1	500	b	C	6.504 4
8	40	20	>63	5	100	c	A	3.831 9
9	40	50	<43	10	250	a	B	4.320 7
10	20	10	>63	10	250	b	A	0.963 9
11	20	20	<43	1	500	c	B	15.550 8
12	20	50	43~63	5	100	a	C	9.265 8
13	30	10	43~63	10	100	c	B	0.901 3
14	30	20	>63	1	250	a	C	17.173 4
15	30	50	<43	5	500	b	A	8.684 6
16	40	10	>63	5	500	a	B	1.824 5
17	40	20	<43	10	100	b	C	1.870 2
18	40	50	43~63	1	250	c	A	45.228 6
均值 1	6.759	3.074	6.446	21.655	10.224	6.803	11.157	
均值 2	11.545	7.268	11.18	4.8	12.147	10.074	10.836	
均值 3	10.597	18.559	11.275	2.445	6.53	12.024	6.907	
极差	4.786	15.485	4.829	19.21	5.617	5.221	4.25	

注:a-在吸附质溶液中加入 10 mL 氢氧化钠水溶液(0.01 mol·L⁻¹);
b-在吸附质溶液中加入 10 mL 去离子水;c-在吸附质溶液中加入 10 mL 盐酸 (0.01 mol·L⁻¹);A-去有机质样;B-原始沉积物样;C-加 10%腐植酸样。

度>吸附剂类型。随着吸附剂浓度的增加,沉积物对p,p'-DDT的吸附量减少,这种现象称为“颗粒效应”或“泥沙效应”,产生的原因有:像有机碳这类络合剂和吸附剂的竞争作用;吸附剂的聚合絮凝增加,使得吸附点位的减少;吸附质的竞争作用等^[17]。从吸附剂类型影响看出,有机质含量越高,沉积物对其吸附量越少,可能是由于溶解有机质的有机溶剂作用,减弱沉积物对液相中p,p'-DDT的吸附^[18]。离子强度对沉积物吸附能力的影响没有明显的规律性,其原因在于p,p'-DDT是非极性有机物。

利用正交软件对实验结果进行方差分析,结果如表4。由此可以看出,在7个影响因素中,有显著性影响的是吸附质浓度和吸附剂浓度,即 F 比> F 临界值,其他因素对吸附的影响不显著。当排放到黄河水体中的p,p'-DDT浓度很大时,沉积物对它的吸附也很大,可以净化水质。但是吸附在沉积物的p,p'-DDT随着时间的延长,也会从沉积物中解吸出来,造成二次污染。

表4 p,p'-DDT 方差分析表

Table 4 Variance analysis of p,p'-DDT

影响因素	偏差平方和	自由度	F 比	F 临界值	显著性
温度	77.08	2	1.068	6.94	无
吸附质浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	769.764	2	10.67	6.94	有
粒度/ μm	91.47	2	1.268	6.94	无
吸附剂浓度/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	1317.364	2	18.261	6.94	有
钙离子强度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	97.782	2	1.355	6.94	无
pH值	83.507	2	1.158	6.94	无
吸附剂类型	67.201	2	0.932	6.94	无
误差	144.28	4			

3 结论

(1)p,p'-DDT在黄河兰州段沉积物中的吸附在24 h内完全达到平衡。

(2)在不同温度、实验的浓度范围($1\sim 50\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)内,p,p'-DDT在黄河兰州段沉积物上的吸附行为用Freundlich模型拟合最好,表明吸附作用和分配作用同时存在。

(3)p,p'-DDT的吸附等温线和解吸等温线不重合,说明p,p'-DDT在黄河兰州段沉积物上的解吸存在滞后性,其与吸附剂密切相关。

(4)正交实验结果表明,吸附剂浓度和吸附质初始浓度对p,p'-DDT在沉积物上的吸附量影响显著,其他因素的影响不大。因此,当河水中p,p'-DDT的

浓度增大时,沉积物对其吸附量也增大,即沉积物是p,p'-DDT的归趋之一。当黄河处于丰水期时,泥沙含量高,吸附的p,p'-DDT也多,相对枯水期而言,河水中p,p'-DDT浓度会降低。

参考文献:

- [1] Paule Vasseur, Carole Cossu-Leguille. Linking molecular interactions to consequent effects of persistent organic pollutants (POPs) upon populations[J]. *Chemosphere*, 2006, 62:1033-1042.
- [2] 陈华林. 沉积物对有机污染物的不可逆吸附行为[D]. 杭州:浙江大学, 2003.
CHEN Hua-lin. Irreversible sorption behaviors of organic pollutants in sediments[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.
- [3] 聂新华. 胶州湾近岸沉积物中有机污染物的吸附解吸研究 [D]. 青岛:中国海洋大学, 2006.
NIE Xin-hua. Study on the adsorption-desorption of the organic pollutants in coastal sediments of Jiaozhou Bay[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2006.
- [4] Fytianos K, Voudrias E, Kokkalis E. Sorption-desorption behaviour of 2, 4-dichlorophenol by marine sediments[J]. *Chemosphere*, 2000, 40:3-6.
- [5] Adi Oren, Benny Chefetz. Sorption-desorption behavior of polycyclic aromatic hydrocarbons in upstream and downstream river sediments[J]. *Chemosphere*, 2005, 61:19-29.
- [6] 黄岁樑, 李海涛. 海河沉积物对邻苯二甲酸二甲酯吸附行为研究[J]. 环境污染与防治, 2007, 29(5):321-356.
HUANG Sui-liang, LI Hai-tao. Adsorption of dimethyl phthalate on sediments[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2007, 29(5):321-356.
- [7] 汪磊, 吴颖虹, 孙红文, 等. 黄河兰州段悬浮颗粒物对菲的吸附行为研究[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(4):1-3.
WANG Lei, WU Ying-hong, SUN Hong-wen, et al. Sorption of phenanthrene on suspended particles in Lanzhou section of Yellow River[J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, 29(4):1-3.
- [8] 何江, 李桂海, 关伟, 等. 黄河沉积物对芳烃类有机物的吸附特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2):312-317.
HE Jiang, LI Gui-hai, GUAN Wei, et al. Adsorption of aromatic compounds on sediments collected from the Yellow River[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2):312-317.
- [9] 戴荣玲, 章钢娅, 宗良纲. 有机粘土和粘土对p,p'-DDE的吸附/解吸研究[J]. 环境污染与防治, 2007, 29(2):85-89.
DAI Rong-ling, ZHANG Gang-ya, ZONG Liang-gang. Adsorption and desorption of p,p'-DDE on natural and HDTMA modified clays[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2007, 29(2):85-89.
- [10] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1978.
Institute of Soil Science Chinese Academy of Sciences. Soil physical and chemical properties analyses[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978.
- [11] 景丽洁, 王晓栋, 黄宏, 等. 三氯苯在淮河流域(江苏段)沉积物上的吸附特性及影响因素[J]. 环境科学, 2005, 26(2):83-87.
JING Li-jie, WANG Xiao-dong, HUANG Hong, et al. Characteristics

- and effect factors for sorption of trichlorobenzene on sediment in Huaihe River (Jiangsu Reach) [J]. *Environmental Science*, 2005, 26(2): 83-87.
- [12] 渠康, 宋庆国, 杨勋兰, 等. 黄河兰州段沉积物对萘和 BHT 的吸附解吸特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1): 113-116.
- QU Kang, SONG Qing-guo, YANG Xun-lan, et al. Sorption and desorption characteristics of naphthalene and BHT on the sediment from Lanzhou part of Yellow River[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1): 113-116.
- [13] 严舜钧. 黄河中上游悬浮物对有机农药的吸附研究[C]//关伯仁, 徐云麟. 黄河水资源保护研究文集. 北京: 北京大学出版社, 1990: 77-90.
- YAN Shun-jun. Sorption of organic pesticide on suspended particles in the middle and upper reaches of the Yellow River[C]//GUAN Bo-ren, XU Yun-lin. Collection of water-resources protection research in Yellow River. Beijing: Peking University Press, 1990: 77-90.
- [14] 张先明, 潘波, 刘文新, 等. 天然土壤中菲的解吸行为特征研究[J]. 环境科学, 2007(2): 272-277.
- ZHANG Xian-ming, PAN Bo, LIU Wen-xin, et al. Desorption behavior characteristics of phenanthrene in natural soils[J]. *Environmental Science*, 2007(2): 272-277.
- [15] Huang W, Weber W J Jr. A distributed reactivity model for sorption by soil and sediments. 11. Slow concentration dependent sorption rates[J]. *Environ Sci Technol*, 1998, 33: 3549-3555.
- [16] 徐红霞, 吴海燕, 张景飞, 等. 2, 4-二氯苯酚在太湖沉积物中的吸附/解吸行为研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1415-1420.
- XU Hong-xia, WU Hai-yan, ZHANG Jing-fei, et al. Study on the sorption/desorption behaviors of 2, 4-Dichlorophenol in Tai Lake sediments[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1415-1420.
- [17] 邓莉萍, 朱校斌, 王新亭, 等. 汛期黄河下游悬浮颗粒物粒度分布及其对铜离子的模拟吸附研究[J]. 海洋科学, 2008, 32(3): 19-24.
- DENG Li-ping, ZHU Xiao-bin, WANG Xin-ting, et al. Granularity distribution of the suspended particles and adsorption of Cu^{2+} from the Lower Reaches of the Yellow River during flood seasons[J]. *Marine Science*, 2008, 32(3): 19-24.
- [18] 陈华林, 陈英旭, 许云台, 等. 上覆水性质对沉积物吸附有机污染物能力的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1938-1942.
- CHEN Hua-lin, Chen Ying-xu, XU Yun-tai, et al. Effects of overlying water properties on sorption of organic pollutants in sediments [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(10): 1938-1942.