

双酚 A 和邻苯二甲酸二正丁酯在纸类上的吸附特性研究

唐琼瑶, 何品晶*, 邵立明, 郑仲

(同济大学环境科学与工程学院污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 采用序批式实验, 考察了报纸对双酚 A (BPA) 和邻苯二甲酸二正丁酯 (DnBP) 的吸附能力, 用 Freundlich、Langmuir、Dubinin-Radushkevich (D-R)、Flory-Huggins (F-H)、BET、Temkin 6 种吸附等温线模型对实验数据进行了拟合, 并选择了回归系数 (R^2)、均方根差 (RMSE) 和卡方检验 (χ^2 检验) 3 种非线性回归方法评价了模型拟合度。结果表明, Freundlich 和 Temkin 吸附等温线模型能很好地描述 BPA 和 DnBP 在纸类表面的吸附, BPA 和 DnBP 的 R^2 均大于 0.95 ($p < 0.01$), RMSE 和 χ^2 分别小于 0.05 和 0.02; 吸附能力与吸附质的疏水性呈正相关。由 D-R 和 F-H 吸附等温线模型拟合结果可知, BPA 和 DnBP 的吸附平均自由能分别为 1.484 和 1.609 kJ/mol; Gibbs 自由能分别为 -6.559 和 -7.021 kJ/mol, 说明 BPA 和 DnBP 在纸类上的吸附为自发的物理吸附。BPA 和 DnBP 在纸类上的 Freundlich 吸附常数 K_f 分别为 0.147 和 0.502 $\text{mg}^{(1-n)} \cdot \text{L}^n \cdot \text{g}^{-1}$, 均高于文献报道的底泥等的吸附常数, 说明生活垃圾填埋场中纸类会阻碍 BPA 和 DnBP 的迁移和生物可利用性。

关键词: 双酚 A; 邻苯二甲酸二正丁酯; 报纸; 吸附等温线; 疏水性; 垃圾填埋

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)08-2282-05

Isothermal Studies on Liquid-Phase Adsorption of Bisphenol A and Dibutyl Phthalate by Paper

TANG Qiong-yao, HE Pin-jing, SHAO Li-ming, ZHENG Zhong

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Adsorption behavior of bisphenol A (BPA) and dibutyl phthalate (DnBP) from aqueous solution onto newsprint was investigated through batch adsorption experiments. Adsorption isothermal data was interpreted by the Freundlich, Langmuir, Dubinin-Radushkevich (D-R), Flory-Huggins (F-H), BET and Temkin equations. In order to determine the best fit isotherm, three error analysis methods were used to evaluate the data: correlation coefficient (R^2), residual root mean square error (RMSE) and chi-square test (χ^2 test). The results show that the Freundlich and Temkin equations provide the best models for BPA and DnBP biosorption with high R^2 ($R^2 > 0.95$, $p < 0.01$) and low values of RMSE and χ^2 (RMSE < 0.05 , $\chi^2 < 0.02$). The adsorption capacity increases with the hydrophobicity of adsorbate. The mean free energy of adsorption process is calculated by D-R isotherm as 1.484 and 1.609 kJ/mol while the Gibbs free energy calculated by F-H isotherm is -6.559 and -7.021 kJ/mol for BPA and DnBP, respectively. From D-R and F-H models, it is inferred that biosorption of BPA and DnBP by newsprint might be physical adsorption and a spontaneous process. As a comparison, it is indicated these K_f values in Freundlich equation (0.147 and 0.502 $\text{mg}^{(1-n)} \cdot \text{L}^n \cdot \text{g}^{-1}$ for BPA and DnBP, respectively), considered as a measure of the adsorption capacity, are higher than those obtained in the adsorption of same adsorbate by natural organic adsorbents, such as sediment. This suggests the presence of paper will retard BPA and DnBP transport and bioavailability in landfills.

Key words: bisphenol A; dibutyl phthalate; newsprint; adsorption isotherms; hydrophobicity; landfill

邻苯二甲酸酯 (phthalic acid esters, PAEs) 和双酚 A (bisphenol A, BPA) 是 2 种 US EPA 优先控制的环境激素类物质, 可以影响人类和其他动物的内分泌行为^[1-3], 导致生殖^[4]、发育^[5] 和行为异常。以 PAEs 和 BPA 作为添加剂的各种工业产品在使用和处理过程中可能将其引入环境中, 危害生态环境。河流^[6]、海洋^[7,8] 和土壤中^[9] 均发现有较高浓度 PAEs 和 BPA 存在。由于城市生活垃圾填埋场汇集了大量废弃日用化学品, PAEs 和 BPA 含量很高^[10], 成为环境中该类物质的重要来源。

填埋场中绝大多数的生物质都以纤维素、半纤维素和木质素为主要成分^[11]。这些有机物对填埋场中疏水性有机物 (hydrophobic organic contaminants, HOCs) 的吸附, 是影响 HOCs 生物降解和迁移的最主要因素之一^[12]。由于纤维素和半纤维素对 HOCs 的吸附能力较低, 木材、植物产生的垃圾对 HOCs 的吸

收稿日期: 2007-08-14; 修订日期: 2007-10-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50578115); 国家自然科学基金重点项目 (50538080)

作者简介: 唐琼瑶 (1982 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为固体废物处理与资源化, E-mail: solidwaste@mail.tongji.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: xhpjk@mail.tongji.edu.cn

附主要由木质素主导^[13, 14]. 而水环境中 PAEs 和 BPA 等环境激素类物质在以木质纤维素为主要成分的基质上的吸附特性尚鲜见报道.

纸类是木质素含量较高的有机物. 随着生活水平的逐渐提高, 纸类在城市生活垃圾中的含量逐年上升^[15, 16]. 本研究选取纸类作为吸附剂, 通过序批式实验和吸附等温线模型拟合, 考察了 BPA 和 PAEs 代表性物质邻苯二甲酸二正丁酯(dibutyl phthalate, DnBP)在以木质纤维素为主要成分的基质上的吸附特性, 从而为垃圾填埋场内 PAEs 和 BPA 的风险评价和归趋模型化提供依据.

1 材料与方法

1.1 化学药品和试剂

实验所用 BPA (> 99%) 购于 Sigma-Aldrich 公司, 化学式为 C₁₅H₁₆O₂, 分子量为 228.3. DnBP(分析纯) 购于国药集团上海化学试剂公司, 化学式为 C₁₆H₂₂O₄, 分子量为 278.35.

实验用甲醇、丙酮、二氯甲烷(HPLC 级) 购于美国 TEDIA 公司; 用乙腈(梯度分析级) 购于德国 MERCK 公司. XAD-2 树脂购于美国 SUPELCO 公司.

1.2 材料和器皿

实验方法参考文献[11, 17]. 选取空白报纸为实验对象(报纸是由机械浆制成, 保留了木材大多数的木质素), 报纸主要成分见表 1^[17]. 将报纸破碎为约 1 cm², 70℃ 烘干至恒重后放入干燥器里待用.

表 1 报纸成分¹⁾/ %
Table 1 Newsprint Composition/ %

吸附剂	纤维素	半纤维素	木质素	天然蛋白质	灰分
报纸	48.3	18.1	22.1	0.44	2.0

1) 以干重计

实验用的所有玻璃容器全部以超声波清洗器洗涤 10 min, 后以蒸馏水淋洗, 进而依次以丙酮、正己烷、二氯甲烷淋洗 3 次, 置于马弗炉中以 400℃ 焙烧 2 h, 冷却待用.

1.3 吸附实验

吸附实验采用序批式实验. 在 150 mL 锥形瓶里加入 1 g 报纸和 50 mL 水溶液(浓度范围 BPA: 3 ~ 9.6 mg/L; DnBP: 1.4 ~ 8.0 mg/L). 预实验结果表明, 报纸对水溶液中 BPA 和 DnBP 的吸附平衡时间分别为 24 h 和 96 h. 用铝箔密封锥形瓶, 橡皮筋扎紧, 放入振荡培养箱以 200 r/min 的转速在 (25 ± 1)℃ 下振荡 24 h(BPA) 或 96 h(DnBP). 所有的样品均为 2 个平行.

空白实验和参比实验采用与吸附实验完全相同的操作方法. 以含相同浓度吸附质、不含报纸的样品作为参比样, 确定操作过程的损失. 以只含报纸和蒸馏水、不含 BPA 和 DnBP 的样品作为空白样, 确定体系背景含量. 参比实验测试结果表明, 操作过程中待测物质有损失, 且多次平行实验结果表明同一浓度下损失量不变. 这可能是由容器玻璃对待测物质的吸附造成的, 因此采用测定参比样中待测物质的浓度作为吸附初始浓度. 空白实验表明, 材料中的待测物质低于检测限.

1.4 分析方法

序批式实验结束后对样品进行过滤, 滤液采用 XAD-2 树脂富集, 并以极性溶剂进行洗脱. 置换溶剂后, BPA 通过 HPLC 进行定量测定, DnBP 通过 GC 进行定量测定.

BPA 采用 Varian Prostar 的 HPLC 进行定量分析. HPLC 组成: 230 三元泵, 335 UV/VIS 检测器. UV/VIS 检测器的检测波长为 278 nm. Workstation Toolbar 进行数据收集和分析. 采用 Waters 分析反相色谱柱(C₁₈ 5 μm, 250 mm × 4.6 mm, Ireland). 流动相为乙腈/水(50:50, 体积比), 流速为 1 mL/min, 室温, 进样量为 20 μL.

DnBP 采用 Thermo GC-FID 进行定量分析. 毛细管色谱柱为 HP-1(30 m × 0.32 mm × 0.25 μm). GC-FID 条件为进样口温度 270℃, 载气为高纯氮气, 1 μL 不分流进样. 程序升温为: 70℃ 起温(1 min), 先以 20℃/min 的速率升至 220℃, 再以 5℃/min 的速率升至 270℃(3 min). 检测器温度 270℃. 自动进样器(Thermo, AI3000)进样, 进样量为 1 μL.

通过公式(1)计算吸附在固体上的物质的量:

$$q_e = \frac{V(c_0 - c_e)}{m}$$

(1)

式中, q_e 为吸附量(mg/g); V 为溶液体积(L); c_e 为溶质平衡浓度(mg/L); m 为报纸质量(g); c_0 为溶质初始浓度(mg/L).

1.5 等温线模型和非线性回归分析

本研究采用了 Freundlich、Langmuir、Dubinin-Radushkevich (D-R)、Flory-Huggins (F-H)、BET、Temkin 6 种等温线模型对实验数据进行了拟合, 并选择了回归系数(R^2)、均方根误差(RMSE)和卡方检验(χ^2 检验) 3 种非线性回归方法评价采用的模型与实验数据的拟合度.

2 结果与讨论

2.1 纸类对 BPA 和 DnBP 的吸附平衡

废纸对 2 种物质的吸附结果见图 1. 根据 Giles 等^[18]提出的吸附等温线模型对实验结果进行分类, 废纸对 BPA 和 DnBP 的吸附是 L 型, 近似 C 型(即线性). 从图 1 可以看出, DnBP 在材料上的吸附量高于 BPA, 这与它们的疏水性关系是一致的($\lg K_{ow}$: BPA = 3.4, DnBP = 4.45). 这表明结构相似的物质, 疏水性越高, 在给定材料上占据的吸附点就越多. 比较 2 种物质的平衡浓度, 可以发现, 2 种物质初始浓度范围接近, 但 DnBP 的平衡浓度远低于 BPA, 这也说明废纸对 DnBP 的吸附远大于 BPA.

2.2 吸附等温线

为考察报纸对 BPA 和 DnBP 的吸附特性, 本研

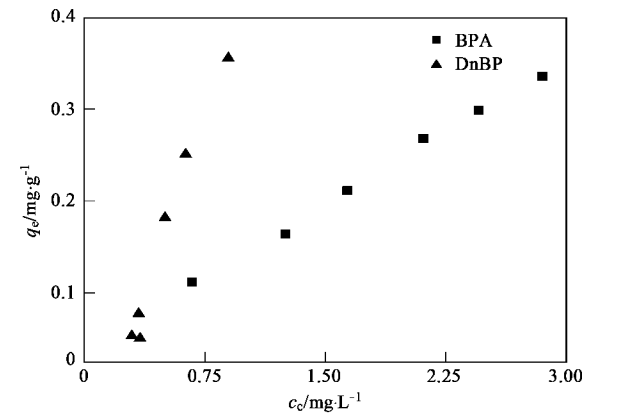


图 1 BPA 和 DnBP 的吸附量与平衡浓度关系
Fig.1 Adsorption isotherms of BPA and DnBP by newsprint

究采用了不同的吸附等温线模型来描述吸附过程的平衡本质.

2.2.1 Freundlich 等温线

Freundlich 等温线模型用于描述非均匀表面的非理想吸附以及多层吸附. 它假设结合力强的吸附位先被占据, 而随着吸附位的占据, 吸附力下降. 此模型认为理论上吸附量可达到无穷大. 表达式如下:

$$q_e = K_f c_e^n \tag{2}$$

式中, K_f 为 Freundlich 常数 [$\text{mg}^{(1-n)} \cdot \text{L}^n \cdot \text{g}^{-1}$]; n 为 Freundlich 常数.

所得 Freundlich 常数 K_f 、 n 见表 2. 可以看出, BPA 和 DnBP 均能满足该模型, 且 BPA 拟合程度更高. BPA 和 DnBP 的 n 值分别为 0.777 和 1.738, 这说明报纸对 2 种物质的吸附都是非线性等温吸附. 报纸的木质素成分中含有 34% 的芳香性组分^[19], Xing^[20]和 Salloum 等^[21]认为有机吸附剂中的芳香性组分与其非线性吸附等温线有关. 从 K_f 来看, BPA < DnBP, 而 BPA 的 $\lg K_{ow}$ 小于 DnBP 的 $\lg K_{ow}$, 说明纸类容易吸附疏水性强的有机物.

与其它文献比较, 报纸对 BPA 和 DnBP 的吸附能力 K_f 均大于河底沉积物^[22,23]对它们的吸附能力, 说明纸对有机污染物的吸附值得关注, 而填埋场中的纸类可能对 BPA 和 DnBP 等环境激素类物质的迁移和生物可利用性起到限制作用.

表 2 纸类对 BPA 和 DnBP 的吸附等温线模型参数

Table 2 Isotherm model constants for BPA and DnBP adsorption on newsprint							
等温线方程	吸附质	等温线常数		非线性回归方法			
		n	$K_f/\text{mg}^{(1-n)} \cdot \text{L}^n \cdot \text{g}^{-1}$	R^2	p	RMSE	χ^2
Freundlich	BPA	0.777	0.147	0.992	< 0.000 1	0.007	0.001
	DnBP	1.738	0.502	0.968	< 0.01	0.041	0.018
Langmuir	BPA	$B/L \cdot \text{mg}^{-1}$	$Q_{\max}/\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	0.822	< 0.05	0.009	0.002
	DnBP	0.169	1.015	0.674	> 0.05	0.080	0.059
D-R	BPA	$X_m/\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	$K_{DR}/\text{mol}^2 \cdot \text{kJ}^{-2}$	0.889	< 0.01	0.080	0.059
	DnBP	0.327	0.227	0.998	< 0.000 1	0.009	0.001
F-H	BPA	n	K_{FH}	0.887	< 0.01	0.010	0.002
	DnBP	4.842	14.086	0.933	< 0.01	0.058	0.027
BET	BPA	K_b	$Q_{\max}/\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	0.834	< 0.05	0.009	0.002
	DnBP	37.262	0.945	0.652	> 0.05	0.076	0.054
Temkin	BPA	$K_t/L \cdot \text{mg}^{-1}$	$B_t/\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	0.950	< 0.001	0.021	0.011
	DnBP	2.669	0.156	0.997	< 0.0001	0.009	0.003

2.2.2 Langmuir 等温线

Langmuir 等温线假设在吸附剂表面的吸附带是由分布均匀的吸附中心所组成, 每一吸附中心只能

吸附一个溶质分子, 且被吸附之溶质分子在吸附剂表面形成单分子层, 当吸附中心都已吸附溶质分子时, 溶质被吸附量即达到饱和. 表达式如下:

$$q_e = \frac{Q_{\max} B c_e}{1 + B c_e} \tag{3}$$

式中, $Q_{\max}$ 为单分子层最大吸附量 (mg/g); B 为吸附平衡常数 (L/mg).

所得 Langmuir 常数 $Q_{\max}$ 、 B 见表 2. 可以看出, 相较于其它模型, BPA 和 DnBP 对 Langmuir 等温线模型的拟合程度较差.

2.2.3 Dubinin-Radushkevich 等温线

由于 D-R 等温线没有假设均质表面或恒定吸附势, 它比 Langmuir 等温线使用范围更广. 该等温模型通常如下表示:

$$\begin{aligned} \ln q_e &= \ln X_m - K_{DR} \epsilon^2 \\ \epsilon &= RT \ln \left(1 + \frac{1}{c_e} \right) \end{aligned} \tag{4}$$

式中, X_m 为最大吸附能力 (mg/g); K_{DR} 为与吸附能相关的常数 (mol^2/kJ^2); ϵ 为 Polanyi 吸附势.

Dubinin 等^[24]曾报道吸附的特征曲线与吸附剂的多孔结构相关. Polanyi 吸附势理论假设吸附剂表面的吸附空间是一定的, 有吸附势存在^[25]. 而吸附质从溶液中无限远处转移到固体表面, 因此 K_{DR} 与每摩尔吸附质的吸附平均自由能相关. 该能量可以通过下式进行计算:

$$E = \frac{1}{\sqrt{2K_{DR}}} \tag{5}$$

所得 D-R 参数 X_m 和 K_{DR} 见表 2. 可以看出, BPA 和 DnBP 均满足该模型, 但 DnBP 比 BPA 更符合 D-R 等温线. BPA 和 DnBP 的 K_{DR} 均小于 1, 这说明吸附剂具有细小的微孔^[26]. E 值的大小可用来估计吸附反应的种类. 通过等式计算出 E 值分别为 1.484 和 1.609 kJ/mol. 物理吸附和化学吸附的平均自由能的范围为 1~8 和 9~16 kJ/mol^[27], 这表明 BPA 和 DnBP 的吸附过程均是物理吸附.

2.2.4 Flory-Huggins 等温线

F-H 模型用来计算吸附剂上吸附质的表面覆盖率特性. F-H 模型的线性形式如下所示:

$$\lg \frac{Q}{c_0} = \lg K_{FH} + n \lg(1 - Q) \tag{6}$$

式中, $Q = (1 - c_e/c_0)$ 为表面覆盖率; K_{FH} 为平衡常数; n 为吸附质占领吸附位的数量.

此外, 平衡常数 K_{FH} 用于计算自发的 Gibbs 自由能. Gibbs 自由能通过下式计算:

$$\Delta G = -2.303RT \lg K_{FH} \tag{7}$$

式中, T 为绝对温度 (K).

F-H 常数 n 和 K_{FH} 见表 2. BPA 和 DnBP 的 n 值

分别为 4.842 和 2.174, 说明在材料表面吸附 1 分子 BPA 和 DnBP 能分别取代 4.842 和 2.174 个水分子. ΔG 呈负值表明吸附过程是自发的. 对 F-H 等温线来说, n 是吸附质占领吸附位的数量. 如表 2 可见, n 值很小, 这说明被吸附的分子主要是在水平位置^[28].

2.2.5 BET 等温线

BET 模型假设初始吸附层在进一步吸附时可以作为基质, 那么在高压下等温线就不会趋于某个饱和值, 而是可以无限制的上升. BET 模型广泛应用于多分子层物理吸附中, 表达式如下:

$$\frac{c_e}{q_e(c - c_e)} = \frac{1}{X_{\max} K_b} + \frac{c_e(K_b - 1)}{c X_{\max} K_b} \tag{8}$$

式中, c 为吸附质饱和溶液浓度 (mg/L); K_b 为与吸附热有关的常数; $X_{\max}$ 为单分子层最大吸附量 (mg/g).

K_b 和 $X_{\max}$ 见表 2. 由表 2 可以发现, 相较于其它模型, BPA 和 DnBP 对 BET 等温线模型的拟合程度较差.

2.2.6 Temkin 等温线

Temkin 等温线模型假设: ① 由于吸附质之间的相互作用, 吸附热随着覆盖率的下降而线性下降, 这与 Freundlich 等温线模型认为的呈对数减少不一致; ② 结合能是均匀分布的. Temkin 等温线模型表达式如下:

$$\begin{aligned} q_e &= B_1 \ln K_1 c_e \\ B_1 &= \frac{RT}{b} \end{aligned} \tag{9}$$

式中, K_1 为与最大结合能相对应的平衡结合常数 (L/mg); B_1 为与吸附热相关 (kJ/mol); b 为与吸附热相关的 Temkin 常数 (kJ/mol).

Temkin 常数 K_1 和 B_1 见表 2. 由表 2 可以看出, BPA 和 DnBP 均满足该模型, 但 DnBP 拟合程度更好. K_1 大, 说明吸附质与吸附剂之间的作用大. K_1 值: DnBP > BPA, 说明吸附质与吸附剂之间的作用: DnBP > BPA, 即废纸更容易吸附 DnBP, 这与 Freundlich 的结论相一致. B_1 与吸附热相关, BPA 和 DnBP 的值都很小, 说明吸附剂表面与吸附质的作用较弱. 这与 D-R 模型的为物理吸附的结论相一致.

对比多个吸附等温线方程的拟合结果, Freundlich 和 Temkin 等温线方程更适于描述疏水性有机物在纸类上的吸附行为, 说明纸类表面具有不均匀性, 不适用理想吸附模型进行描述. 纸类对 BPA 和 DnBP 等疏水性类有机物有较强的吸附作用, 因

此这些疏水性有机物在生活垃圾填埋场等多相环境中的迁移和生物可利用性可能受到限制。

3 结论

(1) 从 R^2 、RMSE 和 χ^2 值来看, Freundlich 和 Temkin 等温线能很好地描述 BPA 和 DnBP 在纸类表面的吸附。

(2) BPA 和 DnBP 在纸类上的吸附为物理吸附, 均为自发的吸热反应; 且 Freundlich 和 Temkin 的结果都表明废纸更容易吸附 DnBP, 这说明吸附能力与它们的疏水性相关。

(3) BPA 和 DnBP 在纸类上的 Freundlich 吸附常数 K_f 均高于文献报道的底泥等的吸附常数, 说明纸类对环境中的该类物质具有较强的阻滞能力。

参考文献:

- [1] Wilkinson C F, Lamb J C. The potential health effects of phthalate esters in children's toy: a review and risk assessment [J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 1999, **30**(2): 140-155.
- [2] Poon R, Lecavalier P, Mueller R, *et al.* Subchronic oral toxicity of di-n-octyl phthalate and di(2-ethylhexyl) phthalate in the rat [J]. Food and Chemical Toxicology, 1997, **35**(2): 225-239.
- [3] Rubin B S, Lenkowski J R, Schaeberle C M, *et al.* Evidence of altered brain sexual differentiation in mice exposed perinatally to low, environmentally relevant levels of bisphenol A [J]. Endocrinology, 2006, **147**(8): 3681-3691.
- [4] Ho S M, Tang W Y, de Frausto J B, *et al.* Developmental exposure to estradiol and bisphenol A increases susceptibility to prostate carcinogenesis and epigenetically regulates phosphodiesterase type 4 variant 4 [J]. Cancer Research, 2006, **66**(11): 5624-5632.
- [5] Markey C M, Luque E H, de Toro M M, *et al.* In utero exposure to bisphenol A alters the development and tissue organization of the mouse mammary gland [J]. Biology of Reproduction, 2001, **65**(4): 1215-1223.
- [6] Fromme H, Küchler T, Otto T, *et al.* Occurrence of phthalates and bisphenol A and F in the environment [J]. Water Research, 2002, **36**(6): 1429-1438.
- [7] Sajiki J, Yonekubo J. Leaching of bisphenol A (BPA) to seawater from polycarbonate plastic and its degradation by reactive oxygen species [J]. Chemosphere, 2003, **51**(1): 55-62.
- [8] Lin Z P, Ikonou M G, Jing H W, *et al.* Determination of phthalate ester congeners and mixtures by LC/ESI-MS in sediments and biota of an urbanized marine inlet [J]. Environmental Science and Technology, 2003, **37**(10): 2100-2108.
- [9] Klammer H J C, Leonards P E G, Lamoree M H, *et al.* A chemical and toxicological profile of Dutch North Sea surface sediments [J]. Chemosphere, 2005, **58**(11): 1579-1587.
- [10] Asakura H, Matsuto T, Tanaka N. Behavior of endocrine-disrupting chemicals in leachate from MSW landfill sites in Japan [J]. Waste Management, 2004, **24**(6): 613-622.
- [11] Chen Y, Knappe D R U, Barlaz M A. Effect of cellulose/hemicellulose and lignin on the bioavailability of toluene sorbed to

- waste paper [J]. Environmental Science and Technology, 2004, **38**(13): 3731-3736.
- [12] Öman C. Comparison between the predicted fate of organic compounds in landfills and the actual emissions [J]. Environmental Science and Technology, 2001, **35**(1): 232-239.
- [13] Mackay A A, Gschwend P M. Sorption of monoaromatic hydrocarbons to wood [J]. Environmental Science and Technology, 2000, **34**(5): 839-845.
- [14] Chen B L, Johnson E J, Chefetz B, *et al.* Sorption of polar and nonpolar aromatic organic contaminants by plant cuticular materials: Role of polarity and accessibility [J]. Environmental Science and Technology, 2005, **39**(16): 6138-6146.
- [15] 上海市市容环境卫生管理局. 上海市固体废弃物处置发展规划[R]. 上海: 上海市市容环境卫生管理局, 2001.
- [16] 王维平. 中国城市生活垃圾对策研究[J]. 自然资源学报, 2000, **15**(2): 128-132.
- [17] Wu B Y, Taylor C M, Knappe D R U, *et al.* Factors controlling alkylbenzene sorption to municipal solid waste [J]. Environmental Science and Technology, 2001, **35**(22): 4569-4576.
- [18] Giles C H, Smith D, Huitson A. A general treatment and classification of the solute adsorption isotherm. Part 1. Theoretical [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1974, **47**(3): 755-765.
- [19] Wang X L, Xing B S. Importance of structural makeup of polymers for organic contaminant sorption [J]. Environmental Science and Technology, 2007, **41**(10): 3559-3565.
- [20] Xing B. Sorption of naphthalene and phenanthrene by soil humic acids [J]. Environmental Pollution, 2001, **111**(2): 303-309.
- [21] Salloom M J, Chefetz B, Hatcher P G. Phenanthrene sorption by aliphatic-rich natural organic matter [J]. Environmental Science and Technology, 2002, **36**(9): 1953-1958.
- [22] Zeng G M, Zhang C, Huang G H, *et al.* Adsorption behavior of bisphenol A on sediments in Xiangjiang River, Central-south China [J]. Chemosphere, 2006, **65**(9): 1490-1499.
- [23] Kao P H, Lee F Y, Hsueh Z Y. Sorption and biodegradation of phthalic acid esters in freshwater sediments [J]. Journal of Environmental Science and Health. Part A, Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering, 2005, **40**(1): 103-115.
- [24] Dubinin M M, Radushkevich L V. Equation of the characteristic curve of activated charcoal [J]. Proceedings of the Academy of Sciences, Physical Chemistry Section, U.S.S.R., 1947, **55**: 331-333.
- [25] Li J, Werth C J. Modeling sorption isotherms of volatile organic chemical mixtures in model and natural solids [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2002, **21**(7): 1377-1383.
- [26] Kim B T, Lee H K, Moon H, *et al.* Adsorption of radionuclides from aqueous solutions by inorganic adsorbents [J]. Separation Science and Technology, 1995, **30**(16): 3165-3182.
- [27] Saeed M M. Adsorption profile and thermodynamic parameters of the preconcentration of Eu (III) on 2-thenoyltrifluoroacetone loaded polyurethane (PUR) foam [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2003, **256**(1): 73-80.
- [28] Blaženka G, Dubravko R, Božena Č. Complex voltammetric and fractal study of adsorbed layer's structure of pure Triton-X-100 and in mixture with *o*-or *p*-nitrophenol [J]. Electrochimica Acta, 2004, **49**(20): 3383-3396.