

# 水合氧化铁对水中酸性品红的吸附-解吸行为

吴永娟<sup>1,2,3</sup>, 彦俊英<sup>4</sup>, 张茜<sup>3</sup>, 陈汝芬<sup>4</sup>, 魏雨<sup>4</sup>, 吴东<sup>1</sup>

1. 中国科学院山西煤炭化学所, 太原 030001
2. 中国科学院大学, 北京 100049
3. 河北师范大学汇华学院, 石家庄 050091
4. 河北师范大学化学与材料科学学院, 石家庄 050086

**摘要** 为了有效地去除工业废水中的阴离子型染料, 本文以酸性品红为模拟污染物, 采用批量吸附-解吸平衡实验, 研究了水合氧化铁(FH)对水中酸性品红(AF)的吸附、解吸特性, 并就 pH 值和温度的影响进行了深入研究。实验数据表明, pH 值对吸附影响较大, pH 值为 4.0 时, FH 对 AF 的吸附效果最佳, 297K 时饱和吸附量达到  $392.2\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。Langmuir 方程比 Freundlich 方程更好地描述了 FH 对 AF 吸附的行为, 表明此吸附是优惠单分子层吸附。FH 对 AF 吸附过程的焓变、熵变和吉布斯自由能数据表明, 该吸附是自发、放热的不可逆吸附。FH 对 AF 的解吸也很好符合 Langmuir 方程, 但表现出一定的滞后效应。滞后效应随溶液中 AF 初始浓度的增加、温度的升高而减弱。不同温度或同一温度、不同初始浓度下, FH 对 AF 的解吸率均低于 9%, 说明 FH 对 AF 吸附具有良好的稳定性。

**关键词** 水合氧化铁; 吸附解吸; 酸性品红; 滞后效应

**中图分类号** X523

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.h1.012

## Adsorption and Desorption of Aqueous Acid Fuchsin on Ferrihydrite

WU Yongjuan<sup>1,2,3</sup>, YAN Junying<sup>4</sup>, ZHANG Qian<sup>3</sup>, CHEN Rufen<sup>4</sup>, WEI Yu<sup>4</sup>, WU Dong<sup>1</sup>

1. Institute of Coal Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Taiyuan 030001, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. Huihua College, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050091, China
4. School of Chemistry and Material Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050086, China

**Abstract** Acid Fuchsin (AF) was selected as a model anionic dye to examine the adsorption-desorption behavior of ferrihydrite to acid fuchsin by using batch equilibration technique. The useful data is provided for the industrial treatment of acid fuchsin and the similar pollutants. The effect of solution pH and temperature on the adsorption of AF onto FH was investigated in detail. The results indicate that ferrihydrite has an optimum condition for the removal of AF at pH 4.0. The maximum adsorption capacity reaches  $392.2\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$  at 297K. Adsorption isotherms of AF at different temperatures are conformed to the Langmuir equation, indicating one monomolecular layer of the coverage on FH surface. The data of Gibbs free energy, enthalpy, and entropy of the adsorption show that the adsorption of AF onto FH is an irreversible, spontaneous, exothermic and chemical process. The AF desorption from FH is also investigated. The isotherms of AF desorption are also conformed to Langmuir equation. The constant values of desorption intensity are much lower than that of adsorption at 297K and 323K with three different concentrations, indicating that AF desorption from FH shows significant hysteric effect. The hysteric coefficient decreases with the increase of AF initial adsorbed concentration or temperature. The desorption rates of AF from FH at different initial concentrations or temperatures are below 9%, therefore the adsorption of AF onto FH has the good stability. On the whole, FH is a highly efficient adsorbent for the removal of AF from contaminated water.

**Keywords** ferrihydrite; adsorption and desorption; AF; hysteric effect

收稿日期: 2012-12-18; 修回日期: 2013-01-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(21077031)

作者简介: 吴永娟, 博士研究生, 研究方向为介孔材料的合成与应用, 电子邮箱: yjwu76@163.com; 魏雨(通信作者), 教授, 研究方向为纳米材料的合成与应用, 电子邮箱: weiyu@mail.hebtu.edu.cn

## 0 引言

酸性品红(AF)是一种水溶性的三苯甲烷染料,广泛应用于生物染色和纺织印染行业。其结构中含有对生物呈强抑制作用的苯环,并且为高共轭分子体系,很难采用生物方法将其降解<sup>[1]</sup>。目前从废水中去除该类染料的主要方法有高级氧化技术(AOPs)<sup>[2-3]</sup>和吸附法<sup>[4-5]</sup>。由于吸附技术设计简单、操作方便和较容易再生,且能从废水中富集分离有机污染物,实现废物资源化,所以吸附技术得到较广泛应用。近年来人们致力于寻找廉价、地方性可利用的高效吸附剂,如生物高聚物的回收利用<sup>[6-7]</sup>、黏土及其与矿物的复合物<sup>[8-10]</sup>。水合氧化铁普遍存在于土壤和水体沉积物中,其较高的比表面积和表面化学活性能对水体中污染物产生较强的吸附能力。通过文献调研发现,有关水合氧化铁吸附重金属离子的研究相对较多<sup>[11,12]</sup>,而对水合氧化铁吸附有机污染物的研究相对较少。本文以酸性品红为模拟污染物,系统研究了水合氧化铁对水中酸性品红的吸附-脱吸行为,并就 pH 值和温度对其的影响进行了深入探讨,为水合氧化铁应用于酸性品红废水及其他类似结构有机废水的治理提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器与试剂

752 型紫外可见分光光度计(中国彩虹公司),PHS-3C 型 pH 计(上海雷磁仪器有限公司);BS110S 型电子天平(德国 Sartorius 公司);ZHWHY-2012C 振荡器;X 射线粉末衍射仪(Bruker,德国),比表面分析仪(Coulter SA-3100,美国)。

硝酸铁  $[\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}]$ 、氢氧化钠、酸性品红  $(\text{C}_{20}\text{H}_{17}\text{N}_3\text{Na}_2\text{O}_9\text{S})$  等均为市售分析纯试剂,所有溶液均采用去离子水配制。

### 1.2 水合氧化铁(FH)的制备

在磁力搅拌下,将计算量的  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3(2\text{mol/L})$  和  $\text{NaOH}(6\text{mol/L})$  同时滴入一定体积的蒸馏水中,控制两种溶液的滴加速度以维持体系的 pH 值 6.5~7.0,当  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$  溶液滴加完毕时,继续搅拌 30min 左右,同时调整反应悬浊液体积至 100mL,使 Fe(III) 的浓度为 0.5mol/L。同时用少量  $\text{NaOH}(0.5\text{mol/L})$  保持体系 pH 值仍在 6.5~7.0 之间,整个制备过程均在恒温水浴(298K)中进行。将得到的红棕色沉淀过滤,用蒸馏水洗涤数次,滤饼于远红外箱中在 313K 左右烘干,研碎后密封保存备用。

### 1.3 批量吸附实验

#### 1.3.1 pH 值对吸附的影响

分别称取 0.02g FH 置于盛有 30mL AF 溶液(100mg/L)的离心管中,用 1mol/L 的 HCl 调节 100mg/L 酸性品红溶液至不同的 pH 值。在温度 297K 条件下,置于恒温振荡器中,以 300r/min 的振荡速度振荡 12h 至吸附平衡,然后快速离心分离,取上层清液,分别分析其浓度变化。

#### 1.3.2 吸附与解吸研究

分别移取不同体积的酸性品红贮备液置于盛有 0.02g

FH 的离心管中,在 297K、313K 和 323K 和 pH 值 4.0 下振荡 12h 至吸附平衡,然后快速离心分离,分别测定其平衡浓度。FH 吸附 AF 的平衡吸附量( $q_e$ )根据下式计算:

$$q_e = \frac{V(C_0 - C_e)}{W}$$

其中,  $C_0$  和  $C_e$  分别为溶液中酸性品红的初始质量浓度和吸附平衡浓度,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $V$  为溶液体积, L;  $W$  为 FH 的质量, g。

吸附实验结束后,将达到吸附平衡的离心管中剩余的上层清液全部倾出,将吸附有 AF 的 FH(0.02g),重新加蒸馏水定容至 30mL,调节溶液 pH 值至 4.0,放入振荡器中继续振荡 12h 至吸附平衡,取样分析。此步骤重复操作 2 次,即解吸 2 次。

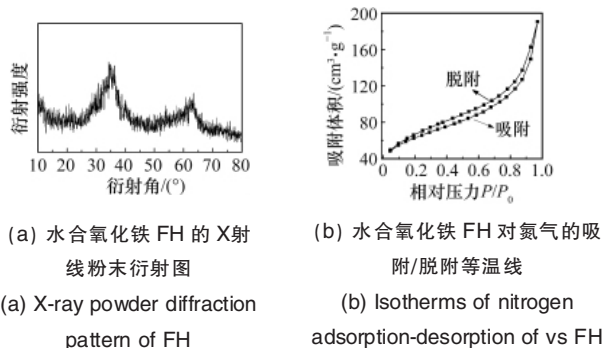
#### 1.3.3 分析方法

利用酸性品红与其最大吸收波长(545nm)有很好的线性相关性这一特点,采用紫外分光光度法测定酸性品红的浓度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 吸附剂的表征

由图 1(a)中衍射峰的位置和强度可以看出,这里合成的是 2-line 水合氧化铁,这与 Drits 等<sup>[13]</sup>报道的计算结果一致。水合氧化铁的多孔隙结构可以从氮气的吸附/脱附等温线图 1(b)看出。测试样品表现出 IUPAC 定义的第 III 种类型等温线<sup>[14]</sup>,等温线上 H-3 型滞后环的出现表明水合氧化铁是粒子堆积形成的狭缝孔材料<sup>[15]</sup>。N<sub>2</sub> 吸附分析表明这里合成的水合氧化铁的总比表面积和外表面积分别为 228.83 和 158.97 $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ,平均孔尺寸和总孔面积分别为 16.38nm 和 69.86 $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。



(a) 水合氧化铁 FH 的 X 射线粉末衍射图  
(b) 水合氧化铁 FH 对氮气的吸附/脱附等温线

图 1 水合氧化铁 FH 的 X 射线粉末衍射图和对氮气的吸附/脱附等温线

Fig. 1 X-ray powder diffraction pattern of FH and isotherms of nitrogen adsorption-desorption

### 2.2 吸附研究

#### 2.2.1 pH 值对吸附的影响

pH 值对吸附的影响如图 2 所示。当溶液的 pH 值小于 4.0 时,吸附量略有减小;但当 pH 值大于 4.0,特别是大于 5.0 时,吸附量急剧下降;当 pH 值为 9.0 时,吸附量几乎为零。AF 是一种带有磺酸根的水溶性阴离子型染料。FH 的  $\text{pH}_{\text{PZC}}$ (表面零电荷时的 pH 值)为 8.2,当溶液的 pH 值大于  $\text{pH}_{\text{PZC}}$  时, FH 表面带负电荷;当溶液的 pH 值小于  $\text{pH}_{\text{PZC}}$ , FH 的表面带正电

荷<sup>[16]</sup>。溶液 pH 值越高, FH 表面正电荷越少, FH 与阴离子型 AF 静电吸引作用越小, 所以 AF 在 FH 的吸附量减小。当 pH 值为 9.0 时, FH 表面带负电荷, 其与 AF 阴离子之间以及吸附的 AF 阴离子之间产生静电排斥作用, 故吸附量几乎为零。当溶液的 pH 值小于 4.0 时, AF 上的磷酸根和氨基 (—NH<sub>2</sub>) 部分质子化形成, 使带正电荷的 FH 与 AF 间的静电吸引作用减弱, 导致吸附量略有减小。因此, 吸附的最佳 pH 值为 4.0。

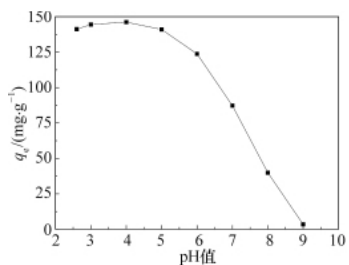


图2 pH 值对吸附的影响

Fig. 2 Effect of pH on the adsorption of AF onto FH

### 2.2.2 吸附等温线及热力学分析

吸附等温线如图 3 所示, 采用著名的 Langmuir 方程和 Freundlich 方程拟合吸附等温线。Langmuir 方程为  $q_e = b_{\text{abs}} q^0 C_e / (1 + b_{\text{abs}} C_e)$ 。其中,  $q^0$  和  $b_{\text{abs}}$  分别为饱和和吸附容量和与吸附能量相关的 Langmuir 吸附常数。Freundlich 方程为  $q_e = K_F C_e^{1/n}$ 。其中,  $K_F$  为异相相吸附剂的 Freundlich 常数;  $n$  与吸附推动力大小和吸附位的能量分布有关。

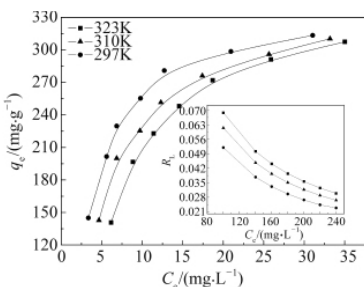


图3 FH 对 AF 的吸附等温线

Fig. 3 Isotherms for the adsorption of AF onto FH

根据 Langmuir 方程和 Freundlich 方程拟合得到的常数见表 1。对比相关系数  $R^2$  可知, 与 Freundlich 方程相比, 不同温度下 FH 对 AF 的吸附行为与 Langmuir 方程有更好的相关性, 表明 AF 在 FH 上产生单分子层吸附。由表 2 可以看出,  $q^0$

表 1 吸附等温线拟合结果

Table 1 Isotherm constants for the adsorption of AF onto FH simulated by both Langmuir equation and the Freundlich equation

Langmuir 方程				Freundlich 方程		
T/K	$q^0 / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$b_{\text{abs}}$	$R^2$	$K_F$	$n$	$R^2$
297	392.16	0.18	0.98	119.40	3.04	0.88
310	380.23	0.15	0.99	91.95	2.72	0.94
323	371.74	0.14	1.00	67.46	2.20	0.88

和  $b_{\text{abs}}$  均随温度的升高而降低, 表明升高温度对 AF 在 FH 上的吸附是不利的。将 Langmuir 吸附等温模型拟合参数  $b_{\text{abs}}$  转换为一个无量纲因子 ( $R_L$ , 式 1) 可以反映吸附反应的可逆程度<sup>[17]</sup>。当  $0 < R_L < 1$  时, 对吸附是有利的; 当  $R_L > 1$  时, 对吸附是不利的; 当  $R_L = 1$  时, 属于线性吸附; 当  $R_L = 0$  时, 吸附是不可逆的。由图 3 的内插图可以看出,  $R_L$  值在温度 297~323K 之间, 不同初始浓度的 AF, 吸附达到平衡后,  $R_L$  值均小于 0.07, 表明 AF 在 FH 上吸附的不可逆程度很高。

$$R_L = \frac{1}{1 + C_0 b_{\text{abs}}} \quad (1)$$

将图 3 不同温度下的数据分别以  $\ln(q_e/C_e)$  对  $q_e$  进行直线拟合。当  $q_e = 0$  时, 对应的截距为 AF 吸附过程的热力学常数  $K_0$ <sup>[18]</sup>。根据 van't Hoff 方程 (式 2), 通过  $\ln K_0$  对  $1/T$  作图, 根据斜率和截距分别计算出吸附反应的焓变  $\Delta H^0$  和熵变  $\Delta S^0$ , 所得结果列于表 2 中。

表 2 FH 在不同温度下吸附 AF 的热力学参数

Table 2 Thermodynamic parameters for the adsorption of AF onto FH with different temperatures

T/K	$K_0$	$\Delta G^0 / (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	$\Delta H^0 / (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	$\Delta S^0 / (\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
297	876.29	-16.68		
310	257.70	-14.43	-68.15	-173.28
323	95.23	-12.18		

$$\ln K_0 = \frac{-\Delta G^0}{RT} = \frac{\Delta S^0}{R} - \frac{\Delta H^0}{R} \frac{1}{T} \quad (2)$$

由表 2 可以看出,  $\Delta H^0$  是负值, 且焓变的绝对值大于  $40 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ , 说明此吸附为放热的化学吸附<sup>[19]</sup>。  $\Delta S^0$  为负值, 表明被吸附到 FH 上的 AF 与它们在溶液中相比, 其运动受到了更大的限制。不同温度下, 吸附自由能变化均为负值, 说明上述吸附过程是自发进行的。

### 2.2.3 解吸等温线及 FH 对 AF 解吸的滞后效应

FH 对 AF 的解吸等温线如图 4 所示, 采用 Langmuir 方程拟合解吸等温线得到的解吸方程参数见表 3 (采用 Freundlich 方程拟合解吸等温线的数据未列出)。图中吸附等温线和解吸等温线之间的夹角称为滞后角, 这种吸附与解吸等温线之间存在明显滞后角的现象定义为解吸等温线的滞后效应<sup>[20]</sup>。

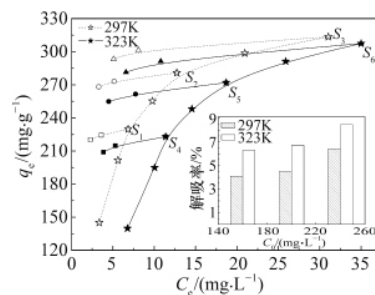


图 4 FH 对 AF 的解吸等温线 (297K:  $S_1, S_2, S_3$ ; 323K:  $S_4, S_5, S_6$ )

Fig. 4 Desorption isotherms of AF from FH at 297K (sample points:  $S_1, S_2, S_3$ ) and 323K (sample points:  $S_4, S_5, S_6$ )

滞后效应可以通过滞后系数  $H$  (式 3)<sup>[21]</sup> 进行量化表示:

$$H = \frac{1/b_{\text{abs}}}{1/b_{\text{des}}} \quad (3)$$

表 3 AF 在 FH 上解吸的 Langmuir 模型拟合参数及滞后系数  
 Table 3 Fitted Langmuir parameters and hysteresis coefficients of AF desorption from FH

$T/K$	$C_0/(mg \cdot L^{-1})$	$q^0/(mg \cdot g^{-1})$	$b_{\text{des}}$	$R^2$	$H$
297	160.00	236.41	5.20	1.00	27.65
	200.00	284.90	4.01	1.00	21.46
	240.00	317.46	2.37	0.99	13.00
323	160.00	223.71	3.78	0.98	26.75
	200.00	278.55	2.28	0.99	16.29
	240.00	313.48	1.31	1.00	9.40

由图 4 和表 3 可以看出, AF 的浓度随着解吸次数的增加而逐渐减少, 解吸曲线平缓, 与 Langmuir 方程有良好的相关性。

将表 2 和图 3 内插图数据与表 3 结果对比可知, FH 对 AF 的解吸作用强度  $b_{\text{des}}$  明显大于吸附作用强度  $b_{\text{abs}}$ , 说明解吸速率明显慢于吸附的速率, FH 对 AF 的解吸具有一定的滞后效应。FH 对 AF 解吸的滞后系数  $H$  见表 3。滞后系数随着 AF 初始浓度的增加呈减小的趋势, 说明其对 AF 解吸的滞后效应随 AF 初始浓度的增加而逐渐减弱。AF 初始浓度相同时, 高温 (323K) 时 FH 对 AF 解吸的滞后系数比低温 (297K) 时 FH 对 AF 解吸的滞后系数小, 表明升温有利于 AF 的解吸。认为造成滞后现象的主要原因可能是 FH 对 AF 较大程度的不可逆吸附。

FH 解吸量的高低能反映其稳定性, 稳定性越高, 实际修复效果越好<sup>[22]</sup>。由图 4 内插图可知, 不同温度、不同初始浓度下, FH 对 AF 的解吸率均低于 9%, 说明 FH 对 AF 吸附具有良好的稳定性。

### 3 结论

(1) pH 值对 FH 吸附 AF 的影响较大, 吸附的最佳 pH 值是 4.0。在该 pH 值下, 297K 时 FH 对 AF 的饱和和吸附量达到  $392.2 mg \cdot g^{-1}$ 。Langmuir 方程比 Freundlich 方程更好地描述 FH 吸附 AF 的行为; 此吸附是优惠吸附且吸附过程为自发、放热、不可逆化学吸附。

(2) FH 对 AF 的解吸作用强度  $b_{\text{des}}$  明显大于吸附作用强度  $b_{\text{abs}}$ , 解吸速率明显慢于吸附速率, FH 对 AF 的解吸具有一定的滞后效应。滞后系数  $H$  随 AF 初始浓度的增大和温度的升高呈减小的趋势, 滞后效应随之减弱。FH 对 AF 的解吸率低, 对已污染环境的实际修复效果良好。

#### 参考文献 (References)

- [1] 徐蕾, 宋如翠.  $H_2O_2$  与 UV/TiO<sub>2</sub> 协同体系光催化降解酸性品红的研究 [J]. 吉林工程技术师范学院学报, 2008, 24(11): 82-84.  
 Xu Lei, Song Rucui. Journal of Jilin Teachers Institute of Engineering and Technology, 2008, 24(11): 82-84.
- [2] 欧晓霞, 张凤杰, 王崇, 等. 芬顿氧化法处理水中酸性品红的研究 [J].

环境工程学报, 2010, 4(7): 1453-1456.

- Ou Xiaoxia, Zhang Fengjie, Wangchun, et al. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(7): 1453-1456.
- [3] 赵斯琴, 长山, 王海, 等. 可见光响应氧化铁复合 TiO<sub>2</sub> 光催化剂的制备及其性能研究 [J]. 化学试剂, 2012, 34(2): 147-150.  
 Zhao Siqin, Chang Shan, Wang Hai, et al. Chemical Agent, 2012, 34(2): 147-150.
- [4] 贾海红, 王学松, 韩宝平. 壳聚糖吸附酸性品红的平衡及动力学研究 [J]. 环境工程学报, 2011, 5(8): 1800-1804.  
 Jia Haihong, Wang Xuesong, Han Baoping. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(8): 1800-1804.
- [5] 宋菊玲, 吴永红, 刘波, 等. 沸石吸附脱除水溶液中品红的研究 [J]. 化学工程与装备, 2012(1): 30-31.  
 Song Juling, Wu Yonghong, Liu Bo, et al. Chemical Engineering and Equipment, 2012(1): 30-31.
- [6] Crini G, Badot P M. Application of chitosan, a natural aminopolysaccharide, for dye removal from aqueous solution by adsorption processes using batch studies: A review of recent literature [J]. Progress in Polymer Science, 2008, 33(4): 399-447.
- [7] Cheung W H, Szeto Y S, McKay G. Enhancing the adsorption capacities of acid dyes by chitosan nano particles [J]. Bioresource Technology, 2009, 100(3): 1143-1148.
- [8] Karim A B, Mounir B, Hachkar M, et al. Removal of basic red 46 dye from aqueous solution by adsorption onto Moroccan clay [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 168(1): 304-309.
- [9] Gecol H, Miakatsindila P, Ergican E, et al. Biopolymer coated clay particles for the adsorption of tungsten from water [J]. Desalination, 2006, 197(1-3): 165-178.
- [10] 汤敏, 任建敏. 纳基膨润土吸附酸性品红的动力学与热力学 [J]. 重庆工商大学学报: 自然科学版, 2010, 27(4): 373-376.  
 Tang Min, Ren Jianmin. Journal of Chongqing Technology and Business University: Natural Science Edition, 2010, 27(3): 373-376.
- [11] Fendorf S, Eick M J, Grossl P, et al. Arsenate and chromate retention mechanisms on goethite surface structure [J]. Environmental Science and Technology, 1997, 31(1): 315-320.
- [12] Meng S, Liu H, Yang C H, et al. Sorption/desorption differences among three Ferrihydrites prepared by different synthesis methods [J]. Applied Surface Science, 2012, 258(7): 4449-4454.
- [13] Drits V A, Sakharov B A, Salyn A L, et al. Structural model for ferrihydrite [J]. Clay Minerals, 1993, 28(2): 185-207.
- [14] Gregg S J, Sing K W. Adsorption, surface area and porosity [M]. 2nd ed. London: Academic Press, 1995.
- [15] Sangwichien C, Aranovich G L, Donohue M D. Density functional theory predictions of adsorption isotherms with hysteretic loops [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects, 2002, 206(19): 313.
- [16] Moreno-Castilla C. Adsorption of organic molecules from aqueous solutions on carbon materials [J]. Carbon, 2004, 42(1): 83-94.
- [17] Aghdas H, Younesia H, Mehraban Z. Removal of Ni(II), Cd(II), and Pb (II) from a ternary aqueous solution by amino functionalized mesoporous and nano mesoporous silica [J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 153(1-3): 70-79.
- [18] 陈云嫩, 丁元春. 谷壳对水中镉离子的吸附动力学及热力学研究 [J]. 安徽农业科学, 2009, 37(7): 3190-3192.  
 Chen Yunen, Ding Yuanchun. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(7): 3190-3192.
- [19] Karaa M, Yuzera H, Sabah E. Adsorption of cobalt from aqueous solutions onto sepiolite [J]. Water Research, 2003, 37(2): 224-232.
- [20] Barriuso E, Laird D A, Koskinen W C, et al. Atrazine desorpt smectites [J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(6): 1632-1638.
- [21] Cox L, Koskinen W C, Yen P Y. Sorption desorption of imidacloprid and it smetabolites in soils [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1997, 45(4): 1468-1472.
- [22] Mersie W, Seybold C. Adsorption and desorption of atrazine, deethylatrazine, deisopropylatrazine, and hydroxyatrazine on levy wetland soil [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(25): 7379-7384.

(责任编辑 许冰, 吴晓丽)