

改良耕层土壤中苯胺的吸附动力学

邓 晶¹, 王朝辉², 张一平², 孟昭福³

(1.西北农林科技大学图书馆, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学资源与环境学院, 陕西 杨凌 712100; 3.西北农林科技大学理学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:研究有机改良土壤对污染物的动力学吸附特征,有助于深入了解其对污染物的吸附机制。以十六烷基三甲基溴化铵单一改良(CB)和十六烷基三甲基溴化铵+十二烷基磺酸钠混合改良(CS)壤土耕层土样,采用批处理法通过不同的速度参数研究了改良土壤对苯胺的吸附动力学特征,并与苯酚对比探讨改良土样对有机污染物吸附的动力学机制。结果表明,壤土耕层土样的有机改良能够显著加快对苯胺的吸附速度,苯胺的吸附反应呈现快速反应和慢速反应两个阶段,且以快速吸附反应为主。总体上耕层土样 V_t 、 $V_{0.5}$ 、 V_f 的大小顺序均为 100CB>120CS>(≈)50CB>CK。随温度升高和苯胺添加浓度增大,苯胺吸附速度增大,苯胺、苯酚的吸附动力学特征在改良土样上具有良好的相似性,从而证实有机污染物以分子状态存在导致的单一疏水吸附是改良土样吸附的决定机制。

关键词:动力学;吸附;有机改良;耕层;壤土;苯胺

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)01-0116-06

Adsorption Kinetics of Aniline in Soil of Modified Tillage-Layer

DENG Jing¹, WANG Zhao-hui², ZHANG Yi-ping², MENG Zhao-fu³

(1.Library of Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2.College of Natural Resource and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3.College of Science, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Using batch experiment, the adsorption kinetics of aniline in tillage layer (TL) of Lou soil modified with cetyltrimethylammonium bromide (CTMAB, CB) at various ratio (100CB and 50CB) and cetyltrimethylammonium bromide + sodium dodecylsulphonate (CTMAB+SDS, CS) mixture were carried out, and comparing to the phenol, the adsorption mechanism of modified TL of Lou soil to organic pollutants was discussed also. The results showed that the modification on the TL of Lou soil increased significantly the adsorption velocity of aniline at two experimental temperature, three adsorption velocity parameters of aniline, total-adsorption-velocity (V_t), fast-adsorption-velocity (V_f) and initial-adsorption-velocity ($V_{0.5}$), on modified soil were 1.62~6.60, 1.62~10.88 and 2.42~12.15 times higher than that on unmodified soil respectively. The adsorption of aniline was divided into two stages, fast adsorption and slow adsorption, in which the adsorption of aniline was primarily decided by the fast adsorption. These velocity parameters of aniline, V_t , V_f and $V_{0.5}$, had a same sequence in different modification treatments, i.e. ordered by 100CB>120CS>(≈)50CB>GCK. The adsorption velocity of organic modified soil to aniline could be increased by an increase of both temperature and added concentration of aniline. The adsorption kinetics characteristics of aniline were similar to that of phenol on the modified soil, but had different temperature effect on unmodified soil, these outcomes demonstrate that the hydrophobic adsorption resulted from molecular state of organic pollutants is the sole adsorption mechanism in organic modified soil.

Keywords: kinetics; adsorption; organic modification; tillage layer; Lou soil; aniline

利用表面活性剂有机化改良土壤来增强土壤表面的疏水性,进而增大土壤对有机污染物吸附固定能力的研究,对于防止有机污染物进入食物链和污染地下水资源,保护生态环境和人体健康具有重要意义。

本文将表面活性剂有机化改良后的土壤定义为有机改良土。许多学者进行的污染物平衡吸附的研究表明,与有机污染物在水相和土壤或粘粒矿物的有机碳之间的分配相关,由于有机改良土表面疏水性有机相的形成增大了土壤或粘粒矿物对有机污染物的疏水吸附,阳离子型有机改良土或粘粒矿物对于有机污染物的吸附能力成倍地增强^[1-9]。不同类型改良剂或螯合剂搭配进行土壤改良对污染物吸附以及微波、光解影响的研究也有了相关的研究报道^[10-14]。

收稿日期:2009-06-20

基金项目:国家自然科学基金项目(40301021)

作者简介:邓 晶(1968—),女,陕西宜川人,工程师,主要从事土壤生态方面的研究。E-mail: djing2008@hotmail.com

通讯作者:孟昭福 E-mail: zfmeng1996@263.net

有机改良土壤或粘粒矿物增强对污染物吸附能力的研究目前主要集中在平衡吸附的研究上,吸附动力学研究目前报道很少^[15-18]。已有吸附动力学研究表明,有机污染物在有机改良土或粘粒矿物上的吸附速率比在未改良土上明显加快^[16-17],吸附是膜扩散过程控制过程^[16],一级^[16]、伪二级动力学方程^[15,17]等模型均可以用来描述其吸附速率的变化,而不同的共存有机物具有竞争吸附效应,可使得有机污染物的吸附速率下降^[18]。

土壤环境中有机污染物主要来源于污水灌溉,位于土壤表面的耕层土壤直接面对着污染物,同时土壤耕层又是植物生长基础,因此研究土壤耕层化学改良对有机污染物吸附速率和机制的变化,对于保护土壤环境,抑制污染物进入食物链和渗入地下水,进而保护人体健康具有重要意义。我们前期以具有弱酸性质的芳香酚类有机污染物——苯酚作为研究对象^[9],研究了改良土样对于苯酚吸附速度特征及机理,得到了较好的结果。但土壤环境中其他有机污染物在改良土样、特别是在改良耕层土样中是否具有类似的吸附动力学特征,以及吸附速度特征与污染物结构之间的关系如何,目前尚未见到报道。这个问题对于探讨改良土样对有机污染物吸附速度的决定机制具有重要意义。本研究在前期研究工作的基础上^[19-20],以十六烷基三甲基溴化铵(CTMAB)单一改良和CTMAB+十二烷基磺酸钠(SDS)混合改良壤土耕层土样,以芳香胺类有机污染物——苯胺作为研究对象,通过不同的速度参数分析其对苯胺吸附速度的变化规律,并通过与苯酚吸附动力学特征的对比探讨耕层土样改良后对有机污染物吸附的动力学机制,为从动力学角度阐述有机改良土样对有机污染物的吸附机理提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

壤土土样为黄土母质,采于西北农林科技大学西农校区北校外200 m处农田中,采样深度0~10 cm,风干,过1 mm尼龙筛。供试土样基本理化性质为pH 8.66、粘粒含量(<0.01 mm)452.2 g·kg⁻¹、有机质11.2 g·kg⁻¹、CEC 206.0 mmol·kg⁻¹、碳酸钙75.5 g·kg⁻¹。供试土样中均未检出苯胺。

阳离子型表面改良剂采用十六烷基三甲基溴化铵(CTMAB, AR),阴离子型表面改良剂采用十二烷基磺酸钠(SDS, AR)。有机污染物采用苯胺, AR 试剂。

土壤表面改良采用湿法^[20]。

1.2 实验设计与方法

1.2.1 实验设计

以未改良壤土耕层原土为对照,按土样CEC分别以比例50%CTMAB、100%CTMAB、100%CTMAB+20%SDS混合进行改良。为叙述简便起见,原土、CTMAB 50%改良土样、CTMAB 100%改良土样、CTMAB 100%+SDS 20%改良土样分别以CK、50CB、100CB、120CS表示。

苯胺设50、200 μg·mL⁻¹ 2个浓度,实验温度设20、40℃ 2个温度,每个处理均设4个重复。

1.2.2 实验方法

动力学实验以Batch法分别进行。各称取2 g土样于9只50 mL具盖玻璃离心管中,以移液管分别加入20.00 mL相同浓度的苯胺溶液,以铝箔衬在盖子内侧,盖紧盖子,以水浴保持恒温。实验开始的8 h连续振荡,然后每隔2 h振荡1次,每次15 min,分别于0.5、1、2、4、6、8、12、24和48 h取1份离心(2 500 r·min⁻¹),取适量上清液于50 mL容量瓶中测定苯胺浓度。改良土样对苯胺的吸附量以加入土样的苯胺起始浓度和某一取样时刻土样上清液苯胺浓度之差计算。

苯胺测定采用SP-2100型UV-VIS分光光度计(上海光谱仪器有限公司)以萘乙二胺法测定,试剂空白校正背景吸收。测定的分析质量控制均采用标准插入法。

1.3 数据处理^[19]

定义以下速度参数以分析苯胺吸附速度变化的特点,所定义的各项速度的单位均为μg·(g·h)⁻¹。

(1) 起始吸附速度 $V_{0.5}$ 定义为0.5 h时的吸附速度, $V_{0.5}=S_{0.5}/0.5$,由于0.5 h是实验中取样时间最短的,可用来描述在吸附起始阶段的吸附速度。

(2) 快速反应阶段平均速度 V_f 定义为快速吸附阶段的平均速度,为快速吸附阶段直线段斜率。

(3) 总反应平均速度 V_t 定义为从吸附起始到实验最后时刻(按实验设计为48 h),土样总吸附量 S_t 与总时间 t_t 之比。即 $V_t=S_t/t_t$,其包括快速吸附和慢速吸附的总平均吸附反应速度。

2 结果与分析

2.1 有机改良土对苯胺的吸附动力学特征

供试壤土耕层土样对苯胺吸附的动力学曲线见图1。结果显示,在2个温度和2个苯胺添加浓度下,各供试耕层土样中苯胺吸附动力学曲线的形式十分相似,均呈现两段型动力学曲线特征,即快速反应阶

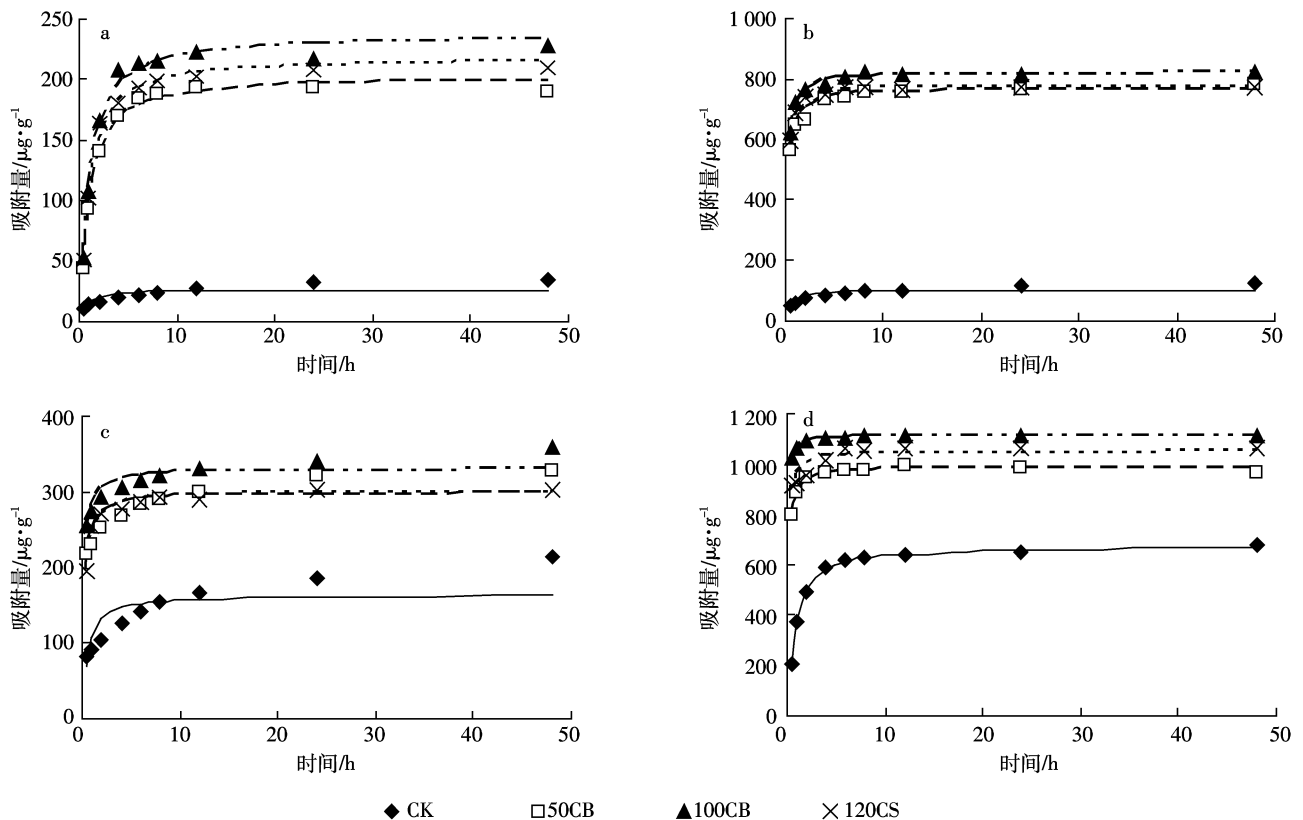
段与慢速反应阶段的形式,该特征在有机改良土样中比未改良原土表现要明显。快速吸附反应阶段随添加浓度不同而不同,当苯胺添加浓度高时,吸附反应进入慢速吸附的时间短,苯胺添加浓度低时则时间长,显示出苯胺吸附也具有浓度效应的特点^[19]。有机改良土样中苯胺达到吸附平衡的速度要快于未改良原土土样,在有机改良土样中,苯胺 12 h 左右可达到吸附平衡,但未改良原土中苯胺的吸附则基本上在 24 h 左右达到平衡。

图 1 同时表明,2 个温度下供试耕层土样对苯胺的吸附,均表现出改良土样远高于未改良原土土样的结果,显示改良对土壤吸附芳香胺类有机物的速度同样具有显著的增强作用。在近于吸附平衡阶段时,比较改良土样吸附苯胺动力学曲线所显示苯胺平衡吸附量的高低,总体上各供试土样中苯胺的高低顺序均为 100CB>120CS>(≈)50CB。与前期壤土耕层土样中苯胺平衡吸附研究的结果^[20]相比较,100CB 的平衡吸附量总是最大这一点在平衡吸附和动力学吸附中具有很好的 consistency。

2.2 苯胺吸附动力学速度参数的变化特征

由于壤土耕层土样中苯胺吸附的慢速反应速度参数规律性较差,同时慢速反应对总反应速度贡献不大^[19],在此也略去对慢速反应的讨论。各项速度特征参数 V_1 、 $V_{0.5}$ 、 V_f 的结果列于表 1。

考察不同改良比例对苯胺吸附速度的影响, V_1 、 $V_{0.5}$ 、 V_f 3 个速度参数虽然在个别土样中略有差异,但总体上具有较高一致性,在改良土样中远高于未改良原土土样,分别增大 1.62~6.60、2.42~12.15 和 1.62~10.88 倍,与图 1 结果以及苯胺吸附等温线的研究结果^[20]相一致,同样从动力学角度证实了改良土样对于苯胺吸附能力的增强,即改良不仅可以增强土样对苯胺的吸附量,同时可以增强吸附反应发生的速度。相同改良剂以不同比例改良时,对苯胺的吸附能力 100CB 土样均高于 50CB 土样。不同改良形式之间的比较显示,单一改良的 100CB 土样各吸附速度参数 V_1 、 $V_{0.5}$ 、 V_f 同样均高于 100%CTMAB+20%SDS 混合改良的 120CS 土样的相应参数,显示出 100CB 的吸附能力最强。在相同的条件下各供试土样间呈现



(a) 20 °C 加入 50 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 苯胺; (b) 20 °C 加入 200 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 苯胺; (c) 40 °C 加入 50 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 苯胺; (d) 40 °C 加入 200 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 苯胺

图 1 苯胺在供试壤土耕层土样中的吸附动力学曲线

Figure 1 Aniline adsorption kinetics in modified tillage-layer of Lou soil

表 1 供试耕层土样中苯胺的吸附速度参数
Table 1 Aniline adsorption velocity parameters in
tillage-layer of Lou soil

温度/℃	加入浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	处理	V_t	$V_{0.5}$	V_f
20	50	CK	0.73	23.57	7.56
		50CB	3.96	88.30	69.70
		100CB	4.76	105.00	82.23
		120CS	4.37	101.96	81.60
	200	CK	2.59	102.00	31.94
		50CB	16.26	1 117.92	284.14
		100CB	17.10	1 238.87	326.11
		120CS	16.10	1 200.00	314.91
	40	CK	4.45	162.43	45.24
		50CB	6.86	437.43	104.70
		100CB	7.49	509.16	123.17
		120CS	6.33	392.84	120.47
40	200	CK	14.05	412.80	238.82
		50CB	20.13	1 591.60	400.35
		100CB	23.19	2 039.72	446.64
		120CS	22.17	1 837.94	387.14

100CB>120CS>50CB>CK 的趋势, 其中 50CB 与 120CS 土样比较, 120CS 土样的吸附能力略强一些。

表 1 显示苯胺吸附速度的温度效应。在 2 个苯胺添加浓度下, 耕层各土样随温度升高, V_t 、 $V_{0.5}$ 、 V_f 各速度参数均相应增大, 与苯胺平衡吸附实验^[20]中耕层各土样温度效应结论相同, 表明耕层各土样在苯胺吸附量与吸附速度对温度的反应上具有共性。

考察苯胺不同添加浓度对吸附速度的影响, 表 1 显示, 添加浓度的增大对于苯胺的吸附速度具有增强作用, 即苯胺的吸附速度具有浓度效应, 增大苯胺添加浓度, 未改良土样及改良土样对苯胺吸附的 V_t 、 $V_{0.5}$ 、 V_f 均相应上升, 且 V_t 、 $V_{0.5}$ 、 V_f 增大的倍数总体上与添加浓度增加的倍数十分接近。

3 讨论

比较苯胺与苯酚^[19]在未改良耕层土样上的吸附动力学特征, 可见总体上二者在 CK 土样吸附速度最小以及浓度效应方面均具有一致性, 但温度效应存在差异, 苯酚在耕层 CK 土样吸附速度随温度上升而下降^[19], 苯胺则相反。由于未改良土样对有机污染物的吸附一方面可以通过土壤有机质、表面能吸附等物理作用进行, 另一方面苯胺可以通过土壤粘粒矿物表面的离子-偶极反应、苯酚可以通过酚羟基上氧原子与

粘粒矿物的氧形成氢键的化学吸附方式吸附^[20]。从苯胺、苯酚的温度效应看, 苯酚在 CK 土样上的吸附是以有机质和表面能的物理吸附为主, 因此苯酚吸附速度随温度升高呈现负效应温度特征, 而苯胺则是以离子-偶极反应这一化学吸附为主, 故此导致吸附速度随温度升高而呈现升温效应。二者温度效应的差异显然是由于分子结构的差异造成的。但同时也可看出, 在 CK 土样表面上两种污染物的吸附作用较之于疏水碳链形成的有机相对有机污染物的吸附能力要弱得多, 因此 CK 土样对苯胺、苯酚的吸附速率均远低于改良土样, 这一点苯酚和苯胺具有共性。

进一步比较苯胺和苯酚在改良土样上的吸附速度特征, 可见二者十分类似。改良土样对于苯胺、苯酚吸附的机制除依然存在前述物理和化学吸附外, 主要是由于有机改良剂形成的有机相的疏水吸附作用。疏水吸附是物理性吸附, 其吸附能障较小, 易于发生, 速度较快, 而化学吸附方式则具有活化能高、吸附速率慢的特点。土壤对苯胺、苯酚均存在快速和慢速吸附两个反应阶段, 说明苯胺、苯酚在吸附的快速阶段以物理吸附为主, 而在吸附的慢速阶段, 物理吸附点位基本上达到饱和, 转而以化学吸附为主。由于在快速反应阶段吸附就已经近于达到吸附平衡, 进一步证实供试土样对于苯胺、苯酚的吸附是以快速吸附(疏水物理吸附)为主。

由于快速反应主要是改良土样表面有机相的疏水吸附, 其同时与改良土壤表面的有机相含量和污染物起始浓度有关, 有机相含量越高, 污染物起始浓度越高, 吸附速率就越高。同一温度下, 苯胺、苯酚在相同改良土样中的吸附速度具有浓度效应支持了这一结果。同时, 不同改良比例土样中改良剂用量及其对苯胺、苯酚的吸附速率均为 100CB>50CB>CK 的结果, 也证实了改良剂用量增大, 改良土样疏水性增强, 对疏水性有机物吸附性能显著增强的结论。120CS 混合改良土样由于 SDS 可通过疏水键吸附在 100% CTMAB 土样上, 其负电荷端向外导致土样的亲水性增加^[21], 因此 120CS 土样吸附苯胺、苯酚的能力要弱于 100CB, 但略强于 50CB 土样。

从温度效应看, 各改良土样对苯胺、苯酚吸附速率整体呈现温度升高, 吸附反应速率加快的温度特征。这主要是因为吸附过程是吸附过程和解吸过程同时进行的, 温度升高, 对于吸附过程和解吸过程的速率均可以起到加快作用。由于在开始阶段, 土壤溶液中苯胺、苯酚浓度高, 而被吸附在土样表面的苯胺、苯

酚浓度小,因此吸附的速率远远高于解吸的速率,总的吸附速率呈现出随温度升高而加快的趋势。

苯胺和苯酚均属于芳香族有机化合物,二者分子结构相似,区别主要在于官能团(氨基、羟基)不同。苯胺属于芳香胺有机弱碱类化合物,其 $pK_b=9.40$,在 $pH<4.6$ 时带正电荷,苯酚属于芳香酚有机弱酸性化合物,其 $pK_a=9.8$,在 $pH>9.8$ 时荷负电,在 $4.6<pH<9.8$ 区间,二者均呈分子状态。苯胺、苯酚动力学吸附机制的对比表明,由于未改良原土表面吸附机制的复杂性,两种有机污染物分子结构上的差异表现出来,而且这种差异主要取决于其化学吸附机制的差异;而在改良土样中,由于苯酚、苯胺在不同 pH 条件下荷电情况不同,但改良土样的疏水性和表面电荷共存^[21],荷电的有机污染物在改良土样中吸附在疏水吸附机制存在的同时,必然存在其他的(如电荷引力或斥力)的吸附机制,因此荷电的苯酚、苯胺必然表现出不同的吸附动力学特征。而在供试耕层土样($pH=8.66$)中,两种有机污染物具有共性,均以分子状态存在,分子结构的差异已不突出,二者的吸附主要取决于 CTMAB 形成的有机相的疏水吸附这一单一机制,因此也就具有了相似的吸附动力学特征。前述的苯胺、苯酚的动力学特征的相似性证实了这一结果。

4 结论

供试壤土耕层土样对苯胺吸附呈现快速反应与慢速反应两段型动力学曲线特征,并以快速吸附反应为主。供试土样中苯胺均为 $100CB>120CS>(\approx)50CB>CK$ 的高低顺序,随温度升高、苯胺添加浓度增大,苯胺吸附速度增大。苯胺、苯酚的吸附动力学特征在改良土样上具有良好的相似性,证实有机污染物以分子状态存在导致的单一疏水吸附是改良土样吸附速度的决定机制。

参考文献:

- [1] Sharmasarkar S, Jaynes W F, Vance G F. BTEX sorption by montmorillonite organo-clays: TPA, Adam, HDTMA[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2000, 119:257-273.
- [2] Upson R T, Burns S E. Sorption of nitroaromatic compounds to synthesized organoclays[J]. *J Colloid Interface Sci*, 2006, 297(1):70-76.
- [3] Groisman L, Rav-Acha C, Gerstl Z, et al. Sorption and detoxification of toxic compounds by a bifunctional organoclay[J]. *J Environ Qual*, 2004, 33(5):1930-1936.
- [4] Chen H, Zhou W J, Zhu K, et al. Sorption of ionizable organic compounds on HDTMA-modified loess soil[J]. *Sci Total Environ*, 2004, 326:217-223.
- [5] Richards S, Bouazza A. Phenol adsorption in organo-modified basaltic clay and bentonite[J]. *Appl Clay Sci*, 2007, 37(1-2):133-142.
- [6] Hernandez-Soriano M C, Pena A, Mingorance M D. Retention of organophosphorous insecticides on a calcareous soil modified by organic amendments and a surfactant[J]. *Sci Total Environ*, 2007, 378(1-2):109-113.
- [7] Shen Y H. Phenol sorption by organoclays having different charge characteristics[J]. *Colloids and Surfaces A*, 2004, 232:143-149.
- [8] 陈宝梁,沈学优,朱利中,等.溴化十四烷基吡啶对膨润土吸附萘的增强效应及机理[J]. *环境科学*, 2003, 24(2):92-96.
CHEN Bao-liang, SHEN Xue-you, ZHU Li-zhong, et al. Enhanced sorption of naphthalene into bentonites in water containing myristyl-pyridinium bromide and its mechanism[J]. *Environmental Science*, 2003, 24(2):92-96.
- [9] 孟昭福,张一平,李荣华.有机修饰壤土对苯酚的吸附及其热力学特征[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(10):1365-1372.
MENG Zhao-fu, ZHANG Yi-ping, LI Rong-hua. Effects of modification of manural loessial soil by adding organic compounds on phenol adsorption and its thermodynamic characteristics[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(10):1365-1372.
- [10] 朱利中,陈宝梁,李铭霞,等.双阳离子有机膨润土吸附水中有机物的特征及机理研究[J]. *环境科学学报*, 1999, 19(6):597-603.
ZHU Li-zhong, CHEN Bao-liang, LI Ming-xia, et al. The characteristics and mechanisms for dual cation organobentonites to sorb organic compounds from water[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1999, 19(6):597-603.
- [11] 朱利中,王 晴,陈宝梁.阴-阳离子有机膨润土吸附水中苯胺、苯酚的性能[J]. *环境科学*, 2000, 21(4):42-46.
ZHU Li-zhong, WANG Qing, CHEN Bao-liang. Sorption of aniline and phenol to anion-cation organobentonites from water[J]. *Environmental Science*, 2000, 21(4):42-46.
- [12] 孙洪良,朱利中.表面活性剂改性的螯合剂有机膨润土对水中有机污染物和重金属的协同吸附研究[J]. *高等学校化学学报*, 2007, 28(8):1475-1479.
SUN Hong-liang, ZHU Li-zhong. Simultaneous adsorption of organic pollutant and heavy metal onto surfactant-modified organobentonites with chelating ligands[J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2007, 28(8):1475-1479.
- [13] 李济吾,朱利中,蔡伟建.微波作用下表面活性剂在膨润土上的吸附行为特征[J]. *环境科学*, 2007, 28(11):2642-2645.
LI Ji-wu, ZHU Li-zhong, CAI Wei-jian. Sorption characteristics of surfactant onto bentonite using microwave irradiation[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(11):2642-2645.
- [14] Rav-Acha C, Groisman L, Mingelgrin U, et al. A mechanistic study of methyl parathion hydrolysis by a bifunctional organoclay[J]. *Environ Sci Technol*, 2007, 41(1):106-111.
- [15] Akcay M. Characterization and adsorption properties of tetrabutylammonium montmorillonite(TBAM) clay: Thermodynamic and kinetic calculations[J]. *J Colloid Interface Sci*, 2006, 296(1):16-21.
- [16] 朱 琨,展惠英,王恩鹏,等.萘和菲在天然和改性黄土中的吸附特性研究[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(4):958-963.

- ZHU Kun, ZHAN Hui-ying, WANG En-peng, et al. Sorption of phenanthrene and naphthalene in natural and HDTMA-modified loess soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(4):958-963.
- [17] 舒月红, 贾晓珊. CTMAB-膨润土从水中吸附氯苯类化合物的机理-吸附动力学与热力学[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(11):1530-1536.
- SHU Yue-hong, JIA Xiao-shan. The mechanisms for CTMAB-bentonites to adsorb CBs from water in the adsorption kinetics and thermodynamics view[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(11):1530-1536.
- [18] 舒月红, 黄小仁, 贾晓珊. 共存污染物对1, 2, 4-三氯苯在CTMAB-膨润土上吸附的影响[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(4):613-619.
- SHU Yue-hong, HUANG Xiao-ren, JIA Xiao-shan. Influences of co-existing contaminants on the sorption of 1, 2, 4-trichlorobenzene by CTMAB-bentonite[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(4):613-619.
- [19] 孟昭福, 邓晶, 杨淑英, 等. 有机修饰壤土对苯酚的吸附动力学[J]. *环境科学*, 2009, 30(1):191-199.
- MENG Zhao-fu, DENG Jing, YANG Shu-ying, et al. Adsorption kinetics of phenol on the organic modified Lou soil[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(1):191-199.
- [20] 孟昭福, 李荣华, 张一平, 等. 有机修饰壤土对苯胺的吸附[J]. *土壤通报*, 2008, 39(1):143-149.
- MENG Zhao-fu, LI Rong-hua, ZHANG Yi-ping, et al. Adsorption of aniline on an organic modified Lou soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(1):143-149.
- [21] Xu S H, Boyd S A. Cation exchange chemistry of hexadecyltrimethylammonium in a subsoil containing vermiculite[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1994, 58:1382-1391.