

# 镉在蒙脱石等粘土矿物上的吸附行为研究

朱霞萍<sup>1</sup>, 白德奎<sup>1</sup>, 李锡坤<sup>2</sup>, 曾江萍<sup>1</sup>, 曹三勇<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学 材料与化学与化工学院, 四川 成都 610059; 2. 广东省物料实验检测中心, 广东 广州 510080)

**摘要:** 研究了土壤中主要硅酸盐粘土矿物蒙脱石、伊利石、高岭石、海泡石对重金属镉的吸附行为。结果表明: 硅酸盐粘土矿物吸附镉受酸度和离子强度的影响, 吸附反应是快反应, 能很好地符合 Lagergren 二级吸附速度方程; 优化条件下的高岭石对镉吸附很弱, 蒙脱石、伊利石、海泡石对镉的实验饱和和吸附容量分别为 2.88、1.08、2.82 mg/g, 蒙脱石吸附镉更适合 Freundlich 拟合, 伊利石、海泡石对镉的吸附结果更适合 Langmuir 拟合; 相关性分析表明, 硅酸盐粘土矿物对镉的饱和吸附容量大小与其理化性质有关, 其中矿物中氧化锰含量高低与其对镉饱和吸附容量大小的相关性达到极显著水平。

**关键词:** 粘土矿物, 镉, 吸附

中图分类号: P579

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2009)06-0643-06

## The adsorption behaviors of montmorillonite and some other clay minerals for cadmium

ZHU Xia-ping<sup>1</sup>, BAI De-kui<sup>1</sup>, LI Xi-kun<sup>2</sup>, ZENG Jiang-ping<sup>1</sup> and CAO San-yong<sup>1</sup>

(1. Institute of Material & Chemistry & Chemical Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;  
2. Material Test Center of Guangdong Province, Guangzhou 510080, China)

**Abstract:** An experimental study of the adsorption of clay minerals such as montmorillonite, illite, kaolinite and sepiolite for Cd<sup>2+</sup> was conducted. The results indicate that acidity and ion intensity are factors affecting adsorption, that the adsorption reaction is rapid, and that adsorption kinetics is fitted well with the Lagergren quasi-second reaction rate model. Under the optional conditions, the adsorption of kaolinite for cadmium is weak, and the saturated adsorption capacities of montmorillonite, illite and sepiolite for cadmium are 2.88, 1.08 and 2.82 mg/g respectively. The behaviors of adsorption of Cd<sup>2+</sup> on montmorillonite are fitted to Freundlich Model, while the behaviors of adsorption of Cd<sup>2+</sup> on illite and sepiolite are fitted to Langmuir Model. Correlation analysis shows that the saturated adsorption capacity of cadmium on silicate clay minerals is related to its physical and chemical properties, and the correlation between manganese oxides and the saturated adsorption capacity of cadmium is extremely significant.

**Key words:** clay minerals; cadmium; adsorption

影响重金属在土壤中环境行为的主要因素包括: 土壤胶粒对重金属离子的吸附, 重金属离子的配合作用, 土壤中重金属离子的沉淀和溶解, 氧化还原作用。其中, 土壤对重金属离子的吸附和离子交换是土壤最重要的化学性质, 是土壤对重

金属具有一定自净能力和环境容量的本质原因(李学恒, 2001)。重金属镉是人类和实验动物肺癌的确认致癌物, 并能诱发实验动物前列腺癌和睾丸癌, 已先后被美国毒理委员会列为第6位危及人体健康的有毒物质, 被国际癌症研究机构

收稿日期: 2009-03-11; 修订日期: 2009-07-06

基金项目: 广东省地调项目(1212010511216-04-02-01); 成都理工大学校研究基金(2006YG05)

作者简介: 朱霞萍(1968-), 女, 博士, 副教授, 主要从事环境分析化学、分离科学与技术研究, E-mail: zhuxiaping@cduet.edu.cn

归类为第一致癌物,被世界卫生组织列入 IPCS( The International Program on Chemical Safety )计划进行研究( Kazuo and Hiroko, 1998 )。联合国环境规划署提出 12 种具有全球性意义的危险化学物质,镉也被列为首位( 任继平等, 2003 )。在重金属的潜在毒性分类中,镉被划为第 I 类( 毒性大 )第 2 位有害元素( 王连生, 1994 )。土壤对镉的吸附与交换性质取决于土壤固相( 即主要为粘粒矿物 )的组成、含量和形态。因此,粘粒矿物的种类和数量不同对土壤中镉元素迁移转化的影响是有差异的。晶质层状硅酸盐粘土矿物( 蒙脱石、伊利石、高岭石、海泡石 )是土壤中最重要粘粒矿物,研究其对重金属镉的吸附对于了解镉在土壤中的迁移、转化具有重要的理论和实际意义。

粘土矿物对重金属离子镉的吸附研究中,关于蒙脱石的吸附研究最多。多数是对蒙脱石进行改性研究,如钠改性( 杨秀红等, 2004 )、酸改性( 彭荣华等, 2006 )、焙烧热改性( 夏畅斌等, 2000 )、盐改性( 刘阳等, 2001 )、有机改性( 苏日娜等, 2007 )等。蒙脱石、伊利石和高岭石对  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{3+}$  这 5 种重金属离子的吸附容量大小与粘土矿物的可交换阳离子容量相关( 何宏平等, 2001 )。钠基伊利石的吸附是基于粘土上钠离子与镉离子的交换( Andreas and Herber, 1996 )。钠离子处理后的伊利石吸附  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  的吸附方程常数与金属离子的第一水解常数相关( Xueyuan and Les, 2007 )。国外很多研究对高岭石进行热改性、酸活化和三聚磷酸改性

( Cynthia *et al.*, 2002 ; Michael *et al.*, 1997 ; Suraj *et al.*, 1998 ; Unuabonaha *et al.*, 2007 )使其吸附容量得到明显提高。以往的研究往往强调对粘粒矿物进行改性以提高其吸附能力,在吸附条件实验中少有讨论离子强度的影响,更少有讨论吸附容量与粘土矿物化学组成的关系。本研究选择蒙脱石、伊利石、高岭石、海泡石为吸附剂,测定了其物理化学性质,讨论了其吸附镉的条件和吸附动力学特征,并把吸附特性与理化性质进行联系,以为土壤滞留重金属镉提供一定的实验依据。

## 1 实验部分

### 1.1 主要仪器和试剂

GGX-6A 塞曼火焰原子吸收光谱仪( 北京地质仪器厂 ); S4 Pioneer X 射线荧光光谱仪( 德国布鲁克公司 ); SHZ-82 回旋式水浴恒温振荡器( 江苏金坛市正基仪器有限公司 ); 电动离心机( 江苏金坛市医疗仪器厂 )。

氯化镉(  $\text{CdCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  分析纯, 成都科龙化工试剂厂 );  $\text{KNO}_3$ 、 $\text{HCl}$ 、 $\text{NaOH}$ 。分析所用的玻璃器皿在使用前均用 10% 硝酸浸泡处理,实验用水为一次蒸馏水。

### 1.2 样品

吸附用粘土矿物样品有蒙脱石、伊利石、高岭石和海泡石,分别产自广东四会、河北、广东茂名、湖南,经 X 射线荧光实验和相关理化性质测定实验,其主要理化性质如表 1 所示。

表 1 粘土矿物主要理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of clay minerals

样品	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{MgO}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{CaO}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{MnO}$	比表面积 $\text{m}^2/\text{g}$	CEC $\text{mmol}/\text{g}$	膨胀倍 $\text{mL}/\text{g}$	胶质价
	%											
海泡石	0.16	9.89	3.70	47.66	0.33	24.28	1.66	0.024 4	103.40	0.233 0	3.3	12.0
伊利石	0.22	18.43	1.38	35.22	0.24	22.40	0.63	0.013 3	48.38	0.110 5	3.1	9.5
高岭石	0.27	0.05	30.05	61.46	0.87	0.04	0.62	0.005 3	18.02	0.097 2	1.7	19.5
蒙脱石	0.24	4.57	15.19	58.17	0.26	2.53	4.78	0.024 0	856.75	0.870 9	10.0	7.5

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 吸附实验

0.250 0 g 样品加入到 50 mL 锥形瓶,固液比 1:100,用 1 mol/L  $\text{KNO}_3$  调节体系离子强度,加入一定浓度的镉溶液,调节 pH 值,25℃ 恒温振荡 1 h,静置 12 h,转移至离心管中,5 600 r/min 离心 20 min,取上清液用火焰原子吸收测定。

#### 1.3.2 吸附动力学实验

0.250 0 g 样品加入到 50 mL 锥形瓶,固液比 1:100,  $\text{Cd}^{2+}$  浓度 20.00  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ,加入 1 mol/L  $\text{KNO}_3$  使其在溶液中浓度为 0.1 mol/L,其余同吸附实验。

## 2 结果与讨论

### 2.1 pH 值对吸附的影响

分别称取蒙脱石和海泡石在 pH 值 2~8 之间进行吸附

实验,结果如图 1,蒙脱石和海泡石对镉的吸附率随 pH 值的增加而增加,  $\text{pH} \geq 6$ , 吸附率达到 98% 以上;在低 pH 值范围内,不利于吸附的进行。因为层状硅酸盐粘土矿物对镉的吸附分为非专性吸附和专性吸附,非专性吸附是非选择性的可逆的静电引力外层络合,专性吸附是镉有选择性地与矿物边缘断键羟基基点的络合反应( 张会民等, 2005, 2006 )。pH 值较低时,溶液中  $\text{H}^+$  的浓度较高,大量的  $\text{H}^+$  被吸附在带负电的粘土表面,与镉离子产生竞争吸附,随 pH 值升高,溶液中  $\text{H}^+$  的浓度降低,对镉离子所产生的竞争吸附作用减弱;另一方面, pH 值升高溶液中  $\text{OH}^-$  的浓度增大,粘土表面吸附的  $\text{OH}^-$  增多,其表面所带的负电荷增加,  $\zeta$  电位的负值增大,即矿物边缘的羟基基团(  $\text{S}-\text{OH}$ , S 表示吸附表面 )增加,与镉离子之间的络合作用增强,使吸附量增加;当溶液中 pH 值继续升高至 8 以上时,镉离子会发生水解反应生成  $\text{Cd}(\text{OH})_2$  沉淀,降低溶液中镉离子浓度,因此,除吸附作用外,土壤 pH 值

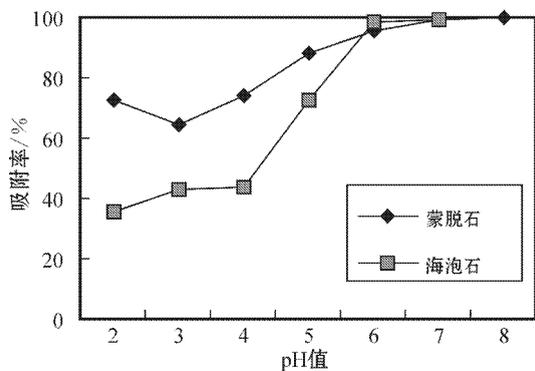


图 1 pH 值对吸附率的影响 ( $C_{KNO_3} = 0.1 \text{ mol/L}$ )

Fig. 1 The effect of pH on adsorption capacity ( $C_{KNO_3} = 0.1 \text{ mol/L}$ )

升高生成  $Cd(OH)_2$  沉淀也是土壤滞留镉的原因之一。

### 2.2 离子强度对吸附的影响

分别称取蒙脱石和海泡石按 1.3.1 所述方法进行离子强度条件实验,结果如图 2,蒙脱石和海泡石对镉的吸附率随体系离子强度的增加而减小,体系中  $KNO_3$  的浓度分别大于 0.04 和 0.06 mol/L 时,海泡石、蒙脱石对镉的吸附率基本达到平衡。离子强度的增加造成吸附率的下降,可能是支持电解质(硝酸钾)的阳离子参与了表面反应,吸附在土壤矿物上的吸附点位,从而降低了对  $Cd^{2+}$  的电性吸附(吴宏海等, 2000)。而当硝酸钾浓度增加到一定程度,吸附曲线变得平缓,表明电性吸附点位吸附阳离子已经饱和,吸附率不受离子强度的影响,  $Cd^{2+}$  的吸附到达专性吸附控制阶段。

从图 1 和图 2 可以看出,粘土矿物对镉的吸附受酸度和离子强度的影响,但矿物种类不同,影响不一样,海泡石受离

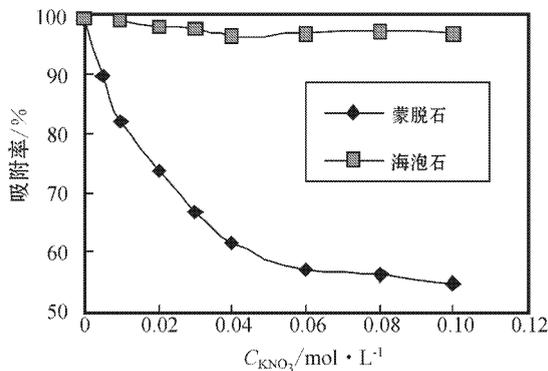


图 2 离子强度对吸附率的影响 ( $pH = 7.0$ )

Fig. 2 The effect of intensity of ions on adsorption capacity ( $pH = 7.0$ )

子强度的影响较小,受酸度的影响较大,而蒙脱石受酸度的影响小,受离子强度的影响特别大,从图 3 也可以看出,当体系中  $KNO_3$  的浓度从 0 增加到 0.1 mol/L,蒙脱石的饱和吸附容量由 28 mg/g 下降到了 2.8 mg/g 左右,降低了 90%。酸度对配位吸附的影响大,而离子强度更容易影响非专性的离子交换吸附,因此,从酸度和离子强度影响粘土矿物吸附镉的结果来看,虽然镉在两种矿物上都存在专性和非专性吸附,但蒙脱石对镉的吸附是非专性的离子交换为主,而海泡石对镉的吸附是镉在矿物边缘断键羟基基位点的络合反应为主。

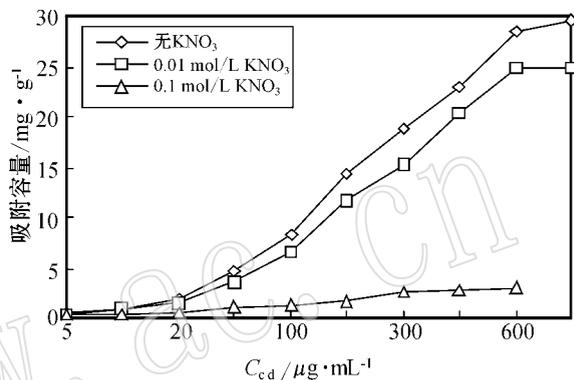


图 3 蒙脱石的吸附曲线 ( $pH = 7.0$ )

Fig. 3 Adsorption curve of montmorillonite

### 2.3 吸附容量实验与等温曲线

分别称取蒙脱石、伊利石、高岭石、海泡石按 1.3.1 所述方法进行饱和吸附容量实验,高岭石对镉的吸附能力差,对 1  $\mu\text{g/mL}$  的镉溶液不产生吸附(吸附容量未检出),其他 3 种矿物吸附结果如图 3、图 4、图 5。蒙脱石、伊利石和海泡石的吸附容量随加入的镉浓度增加而增加,外加镉到一定浓度后,吸附达到饱和,在体系 pH 值为 7,硝酸钾浓度为 0.1 mol/L 时,

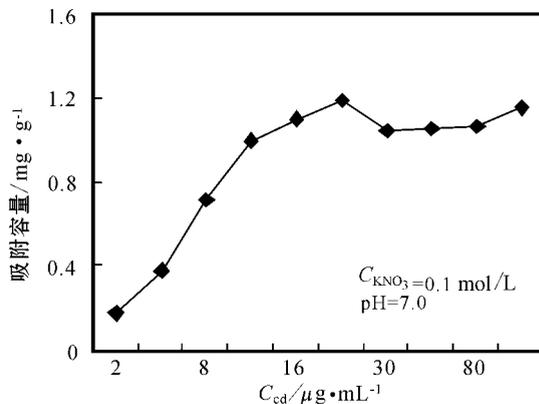


图 4 伊利石吸附曲线

Fig. 4 Adsorption curve of illite

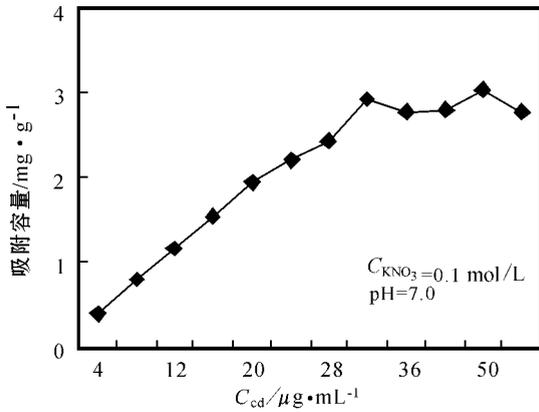


图 5 海泡石吸附曲线

Fig. 5 Adsorption curve of sepiolite

蒙脱石、伊利石、海泡石对镉的实验饱和和吸附容量分别为 2.88、1.08、2.82 mg/g。

对粘土矿物吸附镉的实验结果进行 Langmuir、Freundlich、Temkin 等温线拟合(王忠全等,1996),拟合方程及相关系数见表 2。从拟合方程相关系数看,均大于置信度为 99% 相应的相关系数值,即吸附结果适合于 3 种等温线拟合,但 3 种等温线拟合结果比较,蒙脱石吸附镉更适合 Freundlich 拟合,伊利石、海泡石对镉的吸附结果更适合 Langmuir 拟合。

2.4 吸附动力学实验

分别称取蒙脱石和海泡石按 1.3.2 所述方法进行吸附动力学实验,结果如图 6,蒙脱石和海泡石对镉的吸附反应是快反应,蒙脱石对镉的吸附瞬间达到平衡,海泡石对镉的吸附在 20 min 内基本上完成。对实验数据进行 Lagergren 二级速度方

表 2 粘土矿物等温拟合曲线及其参数

Table 2 Adsorption isotherms and correlation coefficients for Cd of clay minerals

	蒙脱石 (n=9)	伊利石 (n=10)	海泡石 (n=12)
Langmuir	$y = 0.0151x + 0.563$	$y = 0.0097x + 0.5003$	$y = 0.0097x + 0.0846$
$R_1^2$	0.9501	0.9666	0.9936
Freundlich	$y = 0.5062x + 0.6425$	$y = 0.5407x + 0.8342$	$y = 0.8396x + 1.6652$
$R_2^2$	0.987	0.7305	0.9712
Temkin	$y = 1.2849x + 2.9454$	$y = 0.5407x + 1.8342$	$y = 2.6964x + 6.586$
$R_3^2$	0.893	0.7305	0.9611

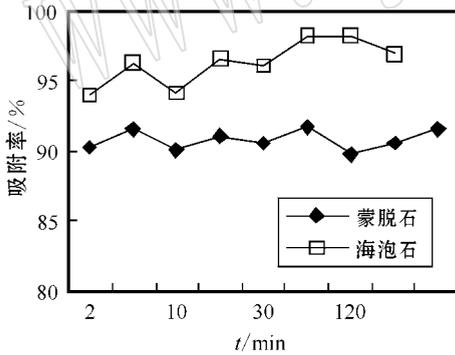


图 6 吸附时间的影响

Fig. 6 The effect of adsorption time

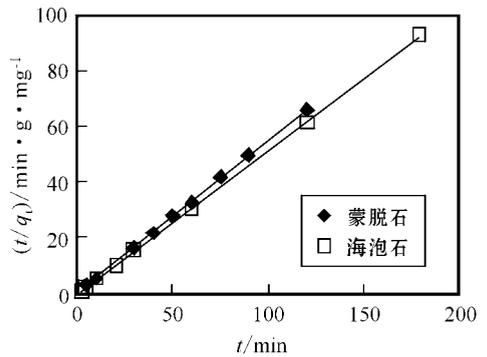


图 7 吸附动力学拟合曲线

Fig. 7 Kinetics curve of Cd adsorption

程  $(t/q_t) = 1/k^2 q_e^2 + t/q_e$ 。t 为吸附时间, min;  $q_t$  和  $q_e$  分别为吸附时间 t 和吸附平衡时的吸附量, mg/g;  $k_2$  为二级吸附速率常数, g/mg·min) 拟合, 拟合结果见图 7 和表 3。从相关系数和标准偏差看, 蒙脱石和海泡石对镉的吸附能很好地符合 Lagergren 二级速度方程式。

$$\Delta q = \sqrt{\frac{\sum (q_{\text{实验}} - q_{\text{计算}})^2 / q_{\text{实验}}}{n-1}} \times 100\%$$

2.5 吸附性能探讨

从实验结果可以看出, 同是硅酸盐矿物, 4 种矿物对镉的

吸附性存在很大的差异, 为了探讨理化性质对 4 种矿物吸附镉的影响, 用 SPSS 软件进行相同条件下蒙脱石、伊利石、海泡石、高岭石的实验饱和和吸附容量(分别为 2.88、1.08、2.82、0 mg/g)与各种理化性质之间的一元线性拟合, 得到的相关系数如表 4 所示。饱和吸附容量与 Na、K、Al 含量负相关, 与 Fe、Mn 含量正相关, 与胶质价负相关, 与比表面积、CEC、膨胀倍正相关。从相关系数看, 粘土矿物对镉的饱和和吸附容量与其他性质的相关性均没有达到显著水平, 而与矿物中 Mn 含量的相关性达到极显著水平, 相关系数为 0.999, 大于置信度

表 3 氧化物吸附动力学曲线拟合数据

Table 3 Kinetics data of oxides

氧化物	动力学方程	平衡吸附量 $q_e/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	吸附速率常数 $k/\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$	相关系数 $R$	标准偏差 $\Delta q/\%$
蒙脱石	$y=0.5485x+0.0986$	1.823	3.051	0.9998	0.77
海泡石	$y=0.5134x+0.0245$	1.948	10.758	0.9999	1.67

表 4 饱和吸附容量与粘土矿物的理化性质的相关系数表

Table 4 Correlation coefficients of adsorption capacity and physical and chemical properties and chemical components of clay minerals

项目	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	比表面积	CEC	膨胀倍	胶质价
$R$	-0.657	0.154	-0.536	-0.066	-0.748	0.305	0.735	0.999	0.633	0.686	0.687	-0.746

为 99% 的相关系数值 0.99, 说明在硅酸盐矿物中氧化锰的含量高低对镉的吸附起了非常重要的作用。饱和吸附容量与各化学组成和理化性质的逐步回归研究表明, 4 种粘土矿物对镉的饱和吸附容量存在以下形式的正相关关系:

$$Q(\text{max}) = 152.5c_{\text{MnO}} - 0.86$$

### 3 结论

(1) 粘土矿物吸附镉是快反应, 符合 Lagergren 二级吸附速度方程。

(2) 优化条件下的高岭土对镉吸附很弱, 而蒙脱石、伊利石、海泡石对镉的实验饱和吸附容量分别约为 2.88、1.08、2.82 mg/g, 蒙脱石吸附镉更适合 Freundlich 拟合, 伊利石、海泡石对镉的吸附结果更适合 Langmuir 拟合。

(3) 硅酸盐粘土矿物对镉的饱和吸附容量大小与其理化性质有关, 饱和吸附容量与 Na、K、Al 含量, 胶质价负相关, 与 Fe、Mn 含量, 比表面积、CEC、膨胀倍正相关, 其中, 矿物中氧化锰含量高低与其对镉饱和吸附容量大小的相关性达到极显著水平。

### References

Andreas P and Herber T. 1996. Kinetics and equilibrium of cadmium complexation with heterogeneous complexants: a stopped-flow study at Na-illite[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 181: 297-305.

Cynthia A, Coles A, Raymond N, et al. 2002. Aspects of kaolinite characterization and retention of Pb and Cd[J]. *Applied Clay Science*, 22: 39-45.

He Hongping, Guo Jiugaon and Zhu Jianxi. 2001. An Experimental Study of Adsorption Capacity of Montmorillonite, Kaolinite and Illite for Heavy Metal[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(4): 573-577(in Chinese with English abstract).

Kazuo N and Hiroko N. 1998. Cadmium-Induced Renal Dysfunction: New Mechanism, Treatment and Prevention[J]. *Trace Elements in Experim Med*, 11: 275-288.

Li Xueheng. 2001. *Soil Chemistry*[M]. Higher Education Press, Beijing (in Chinese).

Liu Yang, Wang Yongqing and Chen Hu. 2001. Bentonite's modifying and its application[J]. *China Ceramic Industry*, (3): 39-42(in Chinese with English abstract).

Michael J A, Bruce B J and John D W. 1997. Adsorption of cadmium (II) on kaolinite[J]. *Colloids and Surfaces A: Physico-chemical and Engineering Aspects*, 126: 137-147.

Peng Ronghua and Li Xiaoxiang. 2006. Adsorption of Ni<sup>2+</sup> and Cd<sup>2+</sup> Ions by Acid-Modified Bentonite[J]. *Materials Protection*, (1): 65-67(in Chinese with English abstract).

Ren Jiping, Li Defa and Zhang Liying. 2003. Advances of the toxicology of cadmium[J]. *Acta Zoonu-trimenta Sinica*, 15(1): 1-6(in Chinese with English abstract).

Su Rina, Lu Anhuai, Liu Zerong, et al. 2007. An experimental study of neutral modification of montmorillonite[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(6): 505-510(in Chinese with English abstract).

Suraj G, Iyer C S P and Lalithambika M. 1998. Adsorption of cadmium and copper by modified kaolinites[J]. *Applied Clay Science*, 13: 293-306.

Unuabonaha E I, Olu-Owolabia B I, Adebowale K O, et al. 2007. Adsorption of lead and cadmium ions from aqueous solutions by tripolyphosphate-impregnated Kaolinite clay[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 292: 202-211.

Wang Liansheng. 1994. *Environmental Health Chemistry*[M]. Science Press Beijing(in Chinese).

Wang Zhongquan, You Zhilin and Liao Zongwen. 1996. The absorb research of As in the soil[J]. *Agriculture and environmental protection*, 15(6): 274-276(in Chinese with English abstract).

Wu Honghai and Wu Daqing. 2000. Influences of aqueous medium conditions on surface reactions of heavy metal ions with quartz[J]. *Geochimica*, 29(1): 62-66(in Chinese with English abstract).

Xia Changbin and He Xiangzhu. 2000. Study on adsorption of heavy metal ions with Natural Bentonite[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resource* (4): 38-40(in Chinese with English abstract).

Xueyuan G and Les J E. 2007. Modelling the adsorption of Cd(II), Cu(II), Ni(II), Pb(II), and Zn(II) onto Fithian illite[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 307: 317-325.

- Yang Xiuhong, Hu Zhengqi and Gao Ailing *et al.* 2004. Study on adsorption of  $Cd^{2+}$  With Na-Modified bentonite[J]. Environmental Chemistry, 23(5):506~509(in Chinese with English abstract).
- Zhang Huiming, Lü Jialong and Xu Mingang, *et al.* 2006. Review of studies on cadmium adsorption by soils[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China (6):8~12(in Chinese with English abstract).
- Zhang Huiming, Xu Mingang and Lü Jialong, *et al.* 2005. A review of studies on effects of pH on cadmium adsorption and desorption in soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 24(supplement):320~324(in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 何宏平,郭九皋,朱建喜,等. 2001. 蒙脱石、高岭石、伊利石对重金属离子吸附容量的实验研究[J]. 岩石矿物学杂志, 20(4):573~577.
- 李学恒. 2001. 土壤化学[M]. 北京:高等教育出版社.
- 刘阳,汪永清,陈虎,等. 2001. 膨润土的改性及其应用[J]. 中国陶瓷工业, (3):39~42.

- 彭荣华,李晓明. 2006. 酸改性膨润土吸附去除镍镉的研究[J]. 材料保护, 1:65~67.
- 任继平,李德发,张丽英. 2003. 镉毒性研究进展[J]. 动物营养学报, 15(1):1~6.
- 苏日娜,鲁安怀,刘泽容,等. 2007. 蒙脱石中性化改性实验研究[J]. 岩石矿物学杂志, 26(6):505~510.
- 王连生. 1994. 环境健康化学[M]. 北京:科学出版社.
- 王忠全,游植麟,廖宗文. 1996. 土壤砷的吸持研究[J]. 农业环境保护, 15(6):274~276.
- 吴宏海,吴大清. 2000. 溶液介质条件对重金属离子与石英表面反应的影响[J]. 地球化学, 29(1):62~66.
- 夏畅斌,何湘柱. 2000. 膨润土对  $Zn(II)$  和  $Cd(II)$  离子的吸附作用研究[J]. 矿产综合利用(4):38~40.
- 杨秀红,胡振琪,高爱林,等. 2004. 钠化改性膨润土对  $Cd^{2+}$  的吸附研究[J]. 环境化学, 23(5):506~509.
- 张会民,吕家珑,徐明岗,等. 2006. 土壤镉吸附的研究进展[J]. 中国土壤与肥料(6):8~12.
- 张会民,徐明岗,吕家珑,等. 2005. pH对土壤及其组分吸附解吸镉的影响研究进展[J]. 农业环境科学学报, 24(增刊):320~324.

www.yskw.ac.cn