

文章编号:0253-9950(2012)06-0369-05

离子强度、pH 和腐殖酸浓度对 $^{63}\text{Ni}(\text{II})$ 在 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 上吸附的影响

刘正杰¹, 陈磊¹, 董云会¹, 李月云¹, 胡君², 王平^{1,*}

1. 山东理工大学 化工学院, 山东 淄博 255049; 2. 中国科学院 等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031

摘要:采用静态批式法研究了 $^{63}\text{Ni}(\text{II})$ 在 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 上的吸附行为。探讨了震荡时间、pH、离子强度、 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 浓度以及腐殖酸对吸附的影响。实验结果表明:在低 pH 条件下,离子强度对 $^{63}\text{Ni}(\text{II})$ 的吸附影响很大, $^{63}\text{Ni}(\text{II})$ 的吸附主要是离子交换和外层表面络合作用;在高 pH 条件下, $^{63}\text{Ni}(\text{II})$ 的吸附受 pH 影响较小, $^{63}\text{Ni}(\text{II})$ 的吸附主要是内层表面络合作用。溶液中的腐殖酸,在低 pH 条件下促进 $^{63}\text{Ni}(\text{II})$ 在 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 上的吸附,而在高 pH 条件下抑制 $^{63}\text{Ni}(\text{II})$ 在 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 上的吸附。

关键词: $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$; 吸附; $^{63}\text{Ni}(\text{II})$; 腐殖酸

中图分类号:TL942.1 **文献标志码:**A

Effect of Ionic Strength, Temperature and Humic Substances Concentration on the Sorption of $^{63}\text{Ni}(\text{II})$ to $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$

LIU Zheng-jie¹, CHEN Lei¹, DONG Yun-hui¹, LI Yue-yun¹, HU Jun², WANG Ping^{1,*}

1. School of Chemical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;

2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

Abstract: The sorption of $^{63}\text{Ni}(\text{II})$ on $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ was studied by using batch technique. The effect of contact time, pH, ionic strength, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ content and humic acid on the sorption of $^{63}\text{Ni}(\text{II})$ on $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ was investigated under ambient conditions. The results suggest that the sorption of $^{63}\text{Ni}(\text{II})$ is strongly dependent on ionic strength at low pH values, and independent on it at high pH values. The sorption of $^{63}\text{Ni}(\text{II})$ at low pH is mainly dominated by ion exchange and/or outer-sphere surface complexation, whereas the sorption of $^{63}\text{Ni}(\text{II})$ at high pH is mainly dominated by inner-sphere surface complexation. The presence of humic acid enhances $^{63}\text{Ni}(\text{II})$ sorption to HA- $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ hybrids at low pH values, but reduces $^{63}\text{Ni}(\text{II})$ sorption to HA- $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ hybrids at high pH values.

Key words: $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$; sorption; $^{63}\text{Ni}(\text{II})$; humic acid

我国有着非常丰富的铝土资源,铝氧化物及其水合物普遍存在于天然土壤和水体系中。在自

然环境中的各种地球化学过程中,铝氧化物通过其固液界面上的反应影响着矿物的溶解、风化、沉

收稿日期:2012-04-11;修订日期:2012-06-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(21107115);山东省自然科学基金资助项目(ZR2009BM045)

作者简介:刘正杰(1988—),男,山东临沂人,硕士研究生,从事污染物治理方面的研究

* 通信联系人:王平, E-mail: hgxywp@sdut.edu.cn

淀和晶体生长等一系列反应,还控制着元素在土壤、沉积物和水体系中的分配,从而对土壤和其它一些天然水体系的反应起重要的调控作用^[1]。氧化铝具有吸附性能、催化活性、高分散度、大比表面积等特性,铝氧化物可以作为工业原料、吸附剂和催化剂载体^[2-3]。

随着核能的发展,越来越多的放射性核素被排放到自然环境中,这对人类的健康有着很大的危害^[4]。吸附作为一种操作简单、成本低廉的方法已经在放射性核素处理方面得到较多的应用。许君政等^[5]研究了 Th(IV)在凹凸棒石上的吸附,发现 Th(IV)在凹凸棒石表面的吸附主要通过内层络合方式进行,而离子交换和外层络合作用微弱;刘昇平等^[6]研究了北山除碳酸盐土壤对 Eu(III)的吸附,发现 pH 对吸附影响显著,低 pH 时以离子交换和外层络合作用为主,高 pH 时内层络合作用为主。⁶³Ni(II)是一种重要的放射性核素,对其在环境中的吸附行为进行研究很有必要。国内外许多研究者对镍的吸附行为作了大量工作^[7-10]。在本工作中以 γ -Al₂O₃ 为吸附材料,经对该材料表征后研究其对 ⁶³Ni(II)的吸附,分析 ⁶³Ni(II)与 γ -Al₂O₃的相互作用。

1 实验部分

1.1 试剂

实验中所用胡敏酸(HA)由甘肃甘南腐黑物中提取;⁶³Ni由中国原子能科学研究院提供,其放射性活度浓度为 7.4×10^9 Bq/L; γ -Al₂O₃经 0.1 mol/L HNO₃纯化,然后用 0.1 mol/L NaOH 洗至 pH=10,最后用蒸馏水清洗至洗涤水与蒸馏水的电导一致为止;Ni(NO₃)₂、NaNO₃、LiNO₃、Mg(NO₃)₂、NaCl、NaClO₄均为市购分析纯;所用蒸馏水为二次蒸馏水。

1.2 实验仪器

VECTOR-22 型傅立叶变换红外光谱仪,美国 PE 公司;D/max- γ B 型 X 射线衍射仪,日本理学电机公司;SZ-2 型双重纯水蒸馏器,上海沪西分析仪器有限公司;5、1、0.1 mL 系列自动取样器,北京青云航空仪表有限公司;AL204 型精密 pH 计和电光分析天平(感量 0.000 1 g),上海梅特勒-托利多仪器有限公司;高速离心机,美国 Beckman Coulter 公司;SHA-C 型水浴恒温振荡器,江苏金坛市金城国胜实验仪器厂;Packard3100TR/AB 液体闪烁计数器,美国 PerkinElmer 公司。

1.3 实验方法

依次向聚乙烯离心管中加入一定量的吸附剂悬浮液、⁶³Ni(II)离子溶液、电解质溶液等,用 NaNO₃调节离子强度,用少量的 HNO₃或 NaOH 调节体系的 pH 至所需值。然后将混合均匀的悬浮液在水浴恒温振荡器上振荡,当吸附达到平衡后,在 8 000 r/min 下离心 30 min,取一定体积上清液,用液体闪烁计数器测量上清液中 ⁶³Ni(II)的放射性计数,从而得到 ⁶³Ni(II)的浓度。HA 的影响试验中, γ -Al₂O₃先与 HA 平衡 24 h,再加 ⁶³Ni(II)离子溶液。

2 结果与讨论

2.1 FTIR 和 XRD 表征结果

图 1 是 γ -Al₂O₃ 的红外光谱图。如图 1 所示,在 3 436 cm⁻¹附近的宽峰是吸附水所对应的伸缩振动吸收峰;1 640 cm⁻¹代表水的弯曲振动吸收峰;1 393 cm⁻¹是 γ -Al₂O₃ 中的振动吸收峰;830 cm⁻¹和 582 cm⁻¹附近的峰可能是成对的 Al—O 所对应的外层吸收峰^[11-12]。

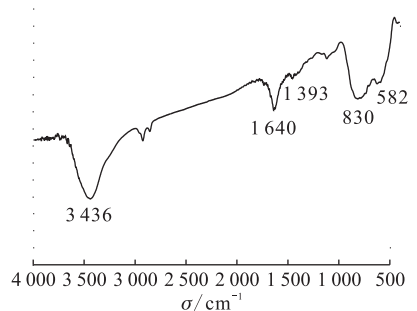


图 1 γ -Al₂O₃ 的 FTIR

Fig. 1 FTIR spectrum of γ -Al₂O₃ sample

图 2 为 γ -Al₂O₃ 的 XRD。由图 2 可知,Al₂O₃成分较复杂,可能含有一些杂质。用标准 JCPDS 对比,证明该样品为 γ -Al₂O₃,是由一水软铝石、一水硬铝石、拜耳石 3 种混合相的铝氧水合物组成。

2.2 吸附时间对吸附的影响

吸附时间对 ⁶³Ni(II)在 γ -Al₂O₃ 上的吸附性能的影响示于图 3。从图 3 可见,⁶³Ni(II)在 γ -Al₂O₃ 上的吸附在 6 h 内即可达到平衡,6 h 后随着吸附时间的增加,吸附率保持不变。如此短的吸附平衡时间也说明了 ⁶³Ni(II)在 γ -Al₂O₃ 上的吸附主要是化学吸附而不是物理吸附^[7]。以下实验吸附时间均至少采用 24 h,确保吸附达到完全平衡。

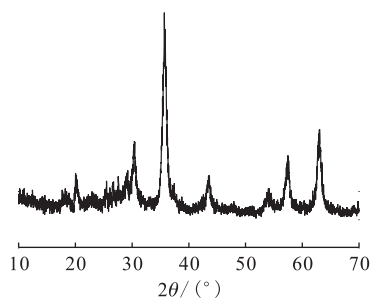
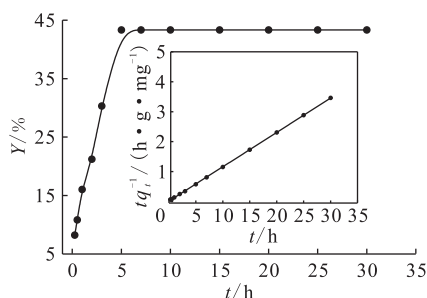
图 2 γ -Al₂O₃的 XRDFig. 2 XRD pattern of γ -Al₂O₃ sample图 3 吸附时间对⁶³Ni(II)在 γ -Al₂O₃上吸附的影响

Fig. 3 Effect of contact time

on ⁶³Ni(II) sorption to γ -Al₂O₃

pH=6.5±0.1, t=(30±1) °C, m/V=0.5 g/L,

c₀(⁶³Ni(II))=1.69×10⁻⁴ mol/L, c₀(NaNO₃)=0.01 mol/L

准二阶动力学方程是描述吸附动力学的一个模型方程,本工作采用了准二阶动力学方程对吸附动力学数据进行分析,即:

$$t/q_t = 1/(k'q_e^2) + t/q_e \quad (1)$$

式中: k' 为动力学方程常数,g/(mg·h); t 为吸附时间,h; q_t 和 q_e 分别为在 t 和吸附达到平衡后所吸附的⁶³Ni(II)的量,mg/g(干重)。准二阶动力学方程的线性拟合曲线也示于图3中,相关系数 $r=0.9999$,最大吸附量 q_e 为8.74 mg/g,动力学方程常数 k' 为0.85 g/(mg·h),实验结果与理论计算结果吻合很好。

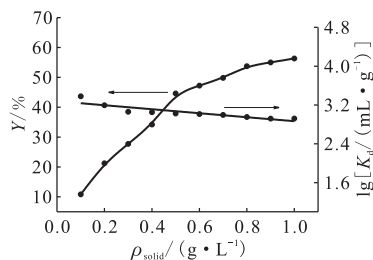
2.3 γ -Al₂O₃浓度的影响

γ -Al₂O₃浓度对⁶³Ni(II)吸附的影响示于图4。由图4看出,液相中⁶³Ni(II)的吸附率随 γ -Al₂O₃用量的增加而增大。这可以解释为随着 γ -Al₂O₃用量的增加, γ -Al₂O₃所提供的可吸附位总量增加,因此,更多的表面吸附位能与⁶³Ni(II)形成络合物。⁶³Ni(II)在固液两相的分配系数 K_d 却随着 γ -Al₂O₃用量的增加而略减小。考虑到吸附在 γ -Al₂O₃上的⁶³Ni(II)的浓度以及离心后依

然存在于溶液中的⁶³Ni(II)的浓度,使用分配系数 K_d 来评估⁶³Ni(II)在 γ -Al₂O₃上的吸附。分配系数由下式计算得到:

$$K_d = \frac{c_0 - c_e}{c_e} \cdot \frac{V}{m} \quad (2)$$

其中: c_0 是⁶³Ni(II)的初始浓度, c_e 是⁶³Ni(II)的平衡浓度, V 是悬浮液的体积, m 是 γ -Al₂O₃的质量。分配系数 K_d 一般不受吸附剂含量的影响,而是代表其吸附能力的一个指标。从图4可以看到,随着 γ -Al₂O₃浓度增大,分配系数略微减小。这可能是因为随着 γ -Al₂O₃用量的增加, γ -Al₂O₃颗粒之间的相互作用增强,导致了 γ -Al₂O₃上的有效位利用率降低,从而使得⁶³Ni(II)在固液两相的分配系数降低^[7]。重金属离子在固液两相的分配系数 K_d 与吸附剂浓度的关系比较复杂,随金属离子的种类和吸附剂的不同而不同。

图 4 体系中 γ -Al₂O₃浓度对⁶³Ni(II)吸附的影响Fig. 4 Effect of solid content on ⁶³Ni(II) sorption to γ -Al₂O₃

pH=6.5±0.1, t=(30±1) °C,

c₀(⁶³Ni(II))=1.69×10⁻⁴ mol/L, c₀(NaNO₃)=0.01 mol/L

2.4 pH 和离子强度的影响

图5所示的是不同pH值下离子强度对 γ -Al₂O₃吸附⁶³Ni(II)的影响。从图5可以看出,吸附受pH影响明显。 γ -Al₂O₃吸附⁶³Ni(II)的曲线可分为3部分:(1)在3.0<pH<6.5时吸附率从5%缓慢增加到30%;(2)pH=6.5~9.0吸附率从30%迅速增至99%;(3)pH>9.0,吸附率保持在最大值99%。在不同的pH时,镍的化学形态有Ni²⁺、Ni(OH)⁺、Ni(OH)₂和Ni(OH)₃⁻^[7]。pH<9.0,Ni²⁺是主要的化学形态和吸附形式。因此,在低pH时,部分Ni²⁺和H⁺发生竞争吸附导致Ni²⁺吸附较低。此外,由于质子化反应, γ -Al₂O₃的表面随着pH的增加而带正电,这导致了Ni²⁺和 γ -Al₂O₃表面的静电反应^[13]。

2.5 不同电解质离子对吸附的影响

不同pH值下Li⁺、Na⁺和Mg²⁺对 γ -Al₂O₃

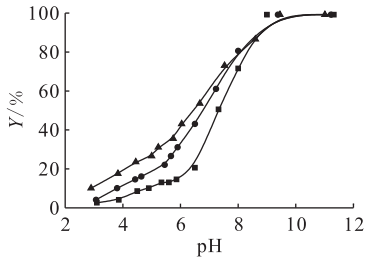


图 5 pH 和离子强度对 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 吸附 $^{63}\text{Ni}(\text{II})$ 的影响

Fig. 5 Effect of ionic strength and pH on $^{63}\text{Ni}(\text{II})$ sorption to $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$

$t = (30 \pm 1)^\circ\text{C}$, $m/V = 0.5 \text{ g/L}$, $c_0(^{63}\text{Ni}(\text{II})) = 1.69 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$
 $c_0(\text{NaNO}_3)$, mol/L: \blacktriangle —0.001, \bullet —0.01, \blacksquare —0.1

吸附 $^{63}\text{Ni}(\text{II})$ 的影响示于图 6(a)。不同阳离子对 $^{63}\text{Ni}(\text{II})$ 在 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 上的吸附率有影响,特别是在低 pH 值范围内。从图 6(a)可以看出,当 $\text{pH} < 9$ 时,同一 pH 值下,阳离子对 $^{63}\text{Ni}(\text{II})$ 吸附的影响顺序是 $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{Mg}^{2+}$,表明体系中的阳离子会改变 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的表面性质,从而影响了 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 对金属离子的吸附能力。同一 pH 值下 $^{63}\text{Ni}(\text{II})$ 吸附量在 Mg^{2+} 离子中最小,在 Li^+ 离子中最大,这一顺序和它们的水合离子半径大小一致: $R(\text{Mg}^{2+}) < R(\text{Na}^+) < R(\text{Li}^+)$ 。 $^{63}\text{Ni}(\text{II})$ 在 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 上的吸附可看

成是 $^{63}\text{Ni}(\text{II})$ 与 $\text{Li}^+/\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}$ 在 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 表面上的竞争吸附。 Mg^{2+} 离子的水合半径是 3 种离子当中最小的,因此相对于另外 2 种离子来说, Mg^{2+} 离子对吸附的影响也是最明显的。但总的说来,单价碱金属离子对 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 吸附二价金属离子的影响还是很小的。仅在 $\text{pH} = 2 \sim 9$ 时,3 种阳离子对吸附有着一定的影响。

不同 pH 值下 ClO_4^- 、 NO_3^- 和 Cl^- 对 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 吸附 $^{63}\text{Ni}(\text{II})$ 的影响示于图 6(b)。阴离子对 Ni^+ 吸附的影响主要是在低 pH 值范围内。可以看出,在 $\text{pH} < 9.0$ 时,同一 pH 值下, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 对 $^{63}\text{Ni}(\text{II})$ 的吸附率大小顺序为 $\text{ClO}_4^- > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$ 。造成该现象的可能原因如下:(1) NO_3^- 和 Cl^- 可和 $\text{Ni}(\text{II})$ 形成可溶解的化合物(例如 NiCl^+ 和 NiNO_3^+),而 ClO_4^- 却不能;(2) 相对于 ClO_4^- 和 NO_3^- , Cl^- 更易在 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 表面吸附,这可以改变 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的表面结构并且减少可用的结合位点;(3) 无机酸根离子半径的大小顺序为 $R(\text{Cl}^-) < R(\text{NO}_3^-) < R(\text{ClO}_4^-)$,阴离子的存在改变了 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 表面的电荷状态,随着无机酸根离子半径的减小,无机酸根离子可能占据了更多表面吸附位,从而降低了吸附^[11,14]。

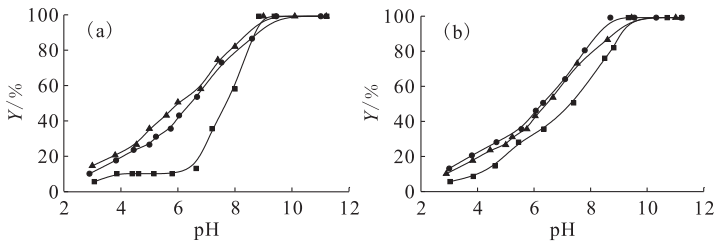


图 6 外加离子对 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 吸附 $^{63}\text{Ni}(\text{II})$ 的影响

Fig. 6 Effect of foreign ions and pH on $^{63}\text{Ni}(\text{II})$ sorption to $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$

$t = (30 \pm 1)^\circ\text{C}$, $m/V = 0.5 \text{ g/L}$, $c_0(^{63}\text{Ni}(\text{II})) = 1.69 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$

(a): \bullet — NaNO_3 , \blacksquare — $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$, \blacktriangle — LiNO_3 ; (b): \bullet — NaClO_4 , \blacksquare — NaCl , \blacktriangle — NaNO_3

2.6 HA 的影响

pH 与 $^{63}\text{Ni}(\text{II})$ 在 HA 覆盖的 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 上的吸附关系示于图 7。从图 7 可看出, $\text{pH} = 3 \sim 9$ 时,在 HA 存在下,其对 $^{63}\text{Ni}(\text{II})$ 在 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 上的吸附有促进作用;而在 $\text{pH} > 9$,可看到 HA 对 $^{63}\text{Ni}(\text{II})$ 的吸附有抑制作用。Yang 等^[15]通过研究发现在 $\text{pH} = 3 \sim 10$ 时 HA 带负电,这一结果与以前的酸碱滴定结果一致^[16]。因此,低 pH 下带负电荷的 HA 很容易吸附到 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 表面上并且离子与 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 表面吸附的 HA 之间相互作用强于与

$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的作用。在高 pH 下, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的表面由于 pH 值的增加导致表面负电荷增加,从而使得带负电荷的 HA 在 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 上的附着能力由于静电排斥作用而有所减弱,被排斥的 HA 在溶液中形成了稳定的 HA-Ni 络合物,因而减少了在 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 上的吸附^[17-18]。

3 结论

通过以上实验结果,可以得到以下结论:

(1) $^{63}\text{Ni}(\text{II})$ 在 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 上的吸附 6 h 即可达到

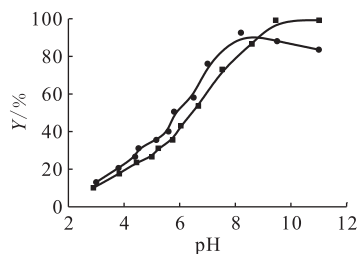


图 7 FA 对 γ -Al₂O₃ 吸附⁶³Ni(II) 的影响

Fig.7 Effect of HA on ⁶³Ni(II) sorption to γ -Al₂O₃ as a function of pH

ρ_0 (HA)=10 mg/L, $t=(30\pm 1)^\circ\text{C}$, $m/V=0.5\text{ g/L}$,

$c_0(^{63}\text{Ni(II)})=1.69\times 10^{-4}\text{ mol/L}$, $c_0(\text{NaNO}_3)=0.01\text{ mol/L}$

●——HA-Al₂O₃, ■——Al₂O₃

平衡,吸附速率服从准二阶吸附动力学速率方程;

(2) pH 对⁶³Ni(II)在 γ -Al₂O₃上的吸附有着强烈的影响:在低 pH 下,离子强度对⁶³Ni(II)的吸附有着较大影响,吸附机理主要为离子交换及外层表面络合作用;在高 pH 下,吸附机理主要是内层表面络合作用;

(3) 在低 pH 下,背景离子对吸附有着较大影响,而高 pH 下,无明显影响;

(4) 溶液中的腐殖酸,在低 pH 时对吸附有促进作用,而在高 pH 时有抑制作用。

参考文献:

- [1] 王东升,杨晓芳,孙中溪. 铝氧化物 2 水界面化学及其在水处理中的应用[J]. 环境科学学报, 2007, 27(3):353-362.
- [2] Umdu E S, Tuncer M, Seker E. Transesterification of Nannochloropsis Oculata Microalga's Lipid to Biodiesel on Al₂O₃ Supported CaO and MgO Catalysts [J]. Bioresour Technol, 2009, 100: 2 828-2 831.
- [3] Sabari G V, Sarathi R, Chakravarthy S R, et al. Studies on Production and Characterization of Nano-Al₂O₃ Powder Using Wire Explosion Technique[J]. Mater Lett, 2004, 58: 1 047-1 050.
- [4] Tan X L, Hu J, Zhou X, et al. Characterization of Lin'an Montmorillonite and Its Application in the Removal of Ni²⁺ From Aqueous Solutions[J]. Radiochim Acta, 2008, 96: 487-495.
- [5] 徐君政,范桥辉,白洪斌,等. 离子强度、温度、pH 和腐殖酸浓度对 Th(IV)在凹凸棒石上吸附的影响[J]. 核化学与放射化学, 2009, 31(3):179-185.
- [6] 刘昇平,范桥辉,潘多强,等. 离子强度、pH 和 HA 对 Eu(III)在北山除碳酸盐土壤上吸附的影响[J]. 核化学与放射化学, 2012, 34(1):46-50.
- [7] Zhang H, Yu X J, Chen L, et al. Investigation of Radionuclide ⁶³Ni(II) Sorption on ZSM-5 Zeolite[J]. J Radioanal Nucl Chem, 2010, 286: 249-258.
- [8] Scheidegger A M, Strawn D G, Lamble G M. The Kinetics of Mixed Ni-Al Hydroxide Formation on Clay and Aluminum Oxide Minerals: A Time-Resolved XAFS Study [J]. Geochim Cosmochim Acta, 1988, 62(13): 2 233-2 245.
- [9] Safdar M, Mustafa S, Naeem A. Effect of Sorption on Co(II), Cu(II), Ni(II) and Zn(II) Ions Precipitation[J]. Desalination, 2011, 266(1-3): 171-174.
- [10] Bradbury M H, Baeyens B. Sorption Modelling on Illite Part I: Titration Measurements and the Sorption of Ni, Co, Eu and Sn[J]. Geochim Cosmochim Acta, 2009, 73(4): 990-1003.
- [11] Guo Z Q, Zhao D L, Li Y, et al. Solution Chemistry Effects on Sorption Behavior of ¹⁰⁹Cd(II) on Ca-Montmorillonite[J]. J Radioanal Nucl Chem, 2011, 288: 829-837.
- [12] Zhao D L, Feng S J, Chen C L, et al. Adsorption of Thorium (IV) on MX-80 Bentonite: Effect of pH, Ionic Strength and Temperature[J]. Appl Clay Sci, 2008, 41: 17-23.
- [13] Yang X, Yang S B, Yang S T, et al. Effect of pH, Ionic Strength and Temperature on Sorption of Pb(II) on NKF-6 Zeolite Studied by Batch Technique [J]. Chem Eng J, 2011, 168: 86-93.
- [14] Fan Q H, Shao D D, Hu J, et al. Comparison of Ni²⁺ Sorption to Bare and ACT-Graft Attapulgitic: Effect of pH, Temperature and Foreign Ions[J]. Surf Sci, 2008, 602: 778-785.
- [15] Yang K, Xing B. Adsorption of Fulvic Acid by Carbon Nanotubes From Water [J]. Environ Pollut, 2009, 157: 1 095-1 100.
- [16] Tan X L, Wang X K, Geckeis H, et al. Sorption of Eu(III) on Humic Acid or Fulvic Acid Bound to Alumina Studied by SEM-EDS, XPS, TRLFS and Batch Techniques[J]. Environ Sci Technol, 2008, 42: 6 532-6 537.
- [17] 王祥科,郑善良. 荧光衰减光谱法研究 Eu(II)在氧化铝表面的化学形态[J]. 核化学与放射化学, 2005, 27(2):108-122.
- [18] Tan X L, Fang M, Chen C L, et al. Counterion Effects of Nickel and Sodium Dodecylbenzene Sulfonate Adsorption to Multiwalled Carbon Nanotubes in Aqueous Solution[J]. Carbon, 2008, 46: 1 741-1 750.