

# 高岭土对U(VI)的吸附性能研究

赵玉婷<sup>1</sup> 冷阳春<sup>1</sup> 王彦惠<sup>1</sup> 卫纯纯<sup>1</sup> 李东瑞<sup>1</sup> 庾先国<sup>2</sup>

1(西南科技大学 国防科技学院 绵阳 621010)

2(四川轻化工大学 自贡 643000)

**摘要** 以高岭土为研究对象,采用静态吸附的实验方法,探讨了吸附时间、铀(VI)的初始浓度、吸附剂质量、pH值、离子种类、腐殖酸质量等因素对铀(VI)吸附的影响。结果表明:高岭土对铀(VI)的吸附性能较好,在6 h时就达到了平衡,最佳铀(VI)的初始浓度为 $60 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ ;最佳的吸附剂质量为0.01 g;随着pH值的增大,高岭土对铀(VI)的吸附效果先增大,后减小,pH=5时,吸附效果最大;溶液中 $\text{K}^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Na}^+$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 对铀(VI)的吸附影响较小, $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 和 $\text{HCO}_3^-$ 对铀(VI)的吸附有抑制效果,不利于吸附;溶液中腐殖酸质量的增加会抑制高岭土对铀(VI)的吸附。实验结果同时表明:准二级动力学模型较准一级动力学模型能更好地描述U(VI)在高岭土上的吸附。

**关键词** 高岭土,铀(VI),吸附性能,动力学模型

**中图分类号** TL941

**DOI:** 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.080302

## Study on adsorption properties of clay rock to uranium (VI)

ZHAO Yuting<sup>1</sup> LENG Yangchun<sup>1</sup> WANG Yanhui<sup>1</sup> WEI Chunchun<sup>1</sup> LI Dongrui<sup>1</sup> TUO Xianguo<sup>2</sup>

1(College of National Defense Science and Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

2(School of Chemistry and Environmental Engineering, Sichuan University of Light Industry, Zigong 643000, China)

**Abstract** [Background] Kaolin is one of clay rocks that can be used to adsorb uranium (VI), but performance has hardly studied. [Purpose] This study aims at the effects of adsorption time, initial U(VI) concentration, adsorption quality, pH value, ion species and humic acid quality on kaolin adsorption U(VI). [Methods] Kaolin 200 mesh, drying reserve, and formation of U(VI) solution with  $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  mass concentration by  $\text{U}_3\text{O}_8$  were prepared. Analytically pure reagents of known content were used to config deionized water and ionic solution with different pH values. Then, experimental method of static adsorption was used for the study. [Results] Kaolin has good adsorption performance for U(VI), and it reaches equilibrium at 6 h. The optimum concentration of U(VI) is  $60 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ . The best adsorbent mass is 0.01 g. When the pH value increases, the adsorption effect of kaolin on U(VI) increases first and then decreases, when pH=5, the adsorption effect is the greatest. In the solution,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  have little effect on the adsorption of U(VI).  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  and  $\text{HCO}_3^-$  have an inhibitory effect on the adsorption of U(VI), which is not conducive to adsorption. Increasing the quality of the humic acid in the solution inhibits the U(VI) adsorption of the kaolin. [Conclusions] The quasi-secondary kinetic model can better describe the adsorption of U(VI) on kaolin than the quasi-first-order kinetic model. This experiment provides a theoretical basis for kaolin as a

国家自然科学基金(No.41630646)、国家自然科学基金青年基金(No.41603124)资助

第一作者: 赵玉婷, 女, 1997年出生, 现为西南科技大学在读本科生, 辐射防护与核安全专业, 研究方向为核素迁移

通信作者: 冷阳春, E-mail: Leng\_yc@swust.edu.cn

收稿日期: 2019-03-25, 修回日期: 2019-05-23

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.41630646), Youth Fund of National Natural Science Foundation of China (No.41603124)

First author: ZHAO Yuting, female, born in 1997, undergraduate in Southwest University of Science and Technology, major in radiation protection and nuclear safety, focusing on radionuclide migration

Corresponding author: LENG Yangchun, E-mail: Leng\_yc@swust.edu.cn

Received date: 2019-03-25, revised date: 2019-05-23

backfill material for radioactive nuclear waste.

**Key words** Kaolin, U(VI), Adsorption ability, Kinetic model

近几年来,能源消耗增长速度明显加长,作为人类主要能源的化石能源储量并不丰富,人类打开了以核能为代表的新能源大门。但是在核能的发展和应用过程中,却伴随着放射性元素对人类生存环境危害等问题<sup>[1-2]</sup>。怎样安全、高效地处理这些核废物成为了人们现在主要的难题。

放射性元素之一的 U(VI) 具有很高的化学毒性和放射性<sup>[3]</sup>,使人体免疫系统受损害,并诱发类似白血病的慢性放射病,会对人体内的造血器官、神经系统、生殖系统和消化系统造成损伤。深地质处置是目前公认的处置高放核废料的最佳方法<sup>[4]</sup>,吸附法<sup>[5]</sup>、化学沉淀法<sup>[6]</sup>、离子交换法<sup>[7]</sup>等是国内外从含铀环境中分离、富集、回收铀的主要方法。现在有多种材料可以吸附放射性元素,比如水泥介质、胶体、粘土矿物等,卢嘉炜等<sup>[8]</sup>研究了地质特种水泥对模拟含铀废液的静态吸附动力学。粘土矿物具有较大的比表面积、多孔结构、吸附性能较好<sup>[5]</sup>等优点,可以作为放射性核废物的潜在回填材料。现在有膨润土、伊俐石、蒙脱石等粘土矿物吸附铀(VI)的研究,关文斌等<sup>[9]</sup>研究了 Cr(VI) 在改性蒙脱土上吸附行为;卢国声等<sup>[10]</sup>研究了铀在亚粘土中的吸附性能。高岭土具有强大的吸附能力,目前关于高岭土吸附铀的研究较少。本文借助静态吸附实验研究高岭土对铀(VI)的吸附性能,为高岭土作为放射性核废物的回填材料提供理论基础。

## 1 实验部分

### 1.1 仪器与试剂

#### 1.1.1 仪器

UV-3150 紫外可见-近红外分光光度计,日本岛津公司;X 射线荧光光谱仪,荷兰帕纳科公司;CHAS-SA 气浴恒温振荡器,金坛科技仪器公司;800-2 型离心机,美国索福公司。

#### 1.1.2 试剂

高岭土(200 目,烘干备用)、U(VI) 标液( $100 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ ,核工业北京化工冶金研究院)、NaCl、 $\text{MgCl}_2$ 、KCl、 $\text{NaHCO}_3$ 、 $\text{NaNO}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{CaCl}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、硝酸、NaOH 溶液、HCl 溶液、无水乙醇、偶氮胂 III 等均为分析纯试剂。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 配置 U(VI) 溶液

用  $\text{U}_3\text{O}_8$  配成质量浓度为  $1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  的 U(VI) 溶液,

取 300 mL U(VI) 溶液到 1 L 的容量瓶中,用超纯水定容,定容成  $300 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$  的 U(VI) 溶液。

#### 1.2.2 配置不同 pH 去离子水及离子溶液

配制 pH 分别为 2、4、5、6、8、10 的溶液备用;分别取适量的 NaCl、 $\text{MgCl}_2$ 、KCl、 $\text{NaHCO}_3$ 、 $\text{NaNO}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$  配置成浓度为  $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  的离子溶液备用。

#### 1.2.3 静态吸附实验

在室温下,称取一定量的高岭土放入超声干燥过的 10 mL 聚丙烯离心管中,加入一定量的超纯水和 U(VI) 溶液,总体积为 8 mL,在振荡器上震荡,之后放入离心机中用  $3\ 000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  的转速离心 10 min 分离固液相,吸取 1 mL 上清液,用 U(VI)-偶氮胂 III 分光光度法测定反应后溶液中的铀(VI)浓度,记录实验数据,计算每组高岭土的吸附分配系数  $K_d$ 。高岭土对 U(VI) 的吸附能力用分配系数  $K_d$  进行衡量,计算公式<sup>[11]</sup>为:

$$K_d = \frac{C_0 - C_t}{C_t} \cdot \frac{V}{m} \quad (1)$$

式中: $K_d$  为吸附分配系数,  $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$ ;  $C_0$  为 U(VI) 的初始浓度,  $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ ;  $C_t$  为平衡后的铀浓度,  $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ ;  $V$  为液体的总体积, mL;  $m$  为高岭土质量, g。

反应时间对实验的影响:称取 0.04 g 高岭土样品于离心管中,加入 7.2 mL 超纯水和 0.8 mL U(VI) 标液,调节溶液 pH 为 5,在震荡箱中震荡,分别在震荡 0.5 h、1.0 h、2.0 h、4.0 h、5.0 h、5.5 h、6.0 h、6.5 h、7.0 h、8.0 h、10.0 h、12.0 h、14.0 h、16.0 h、18.0 h、20.0 h、24.0 h 后取出,放入离心机中用  $3\ 000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  的转速离心 10 min,取出,吸取 1 mL 上清液测定反应后溶液中的铀浓度。

初始浓度对实验的影响:称取 0.04 g 高岭土样品于离心管中,分别加入不同体积的超纯水和 U(VI) 溶液, U(VI) 初始浓度分别为  $5 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、 $10 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、 $20 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、 $30 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、 $60 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、 $90 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、 $100 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ ,调节溶液 pH 为 5,在震荡箱中震荡,在平衡时间时取出,剩余步骤同上。

吸附剂质量对实验的影响:分别称取 0.01 g、0.02 g、0.04 g、0.06 g、0.08 g、0.10 g 高岭土样品于离心管中,加入 7.2 mL 超纯水和 0.8 mL U(VI) 标液,调节溶液 pH 为 5,剩余步骤同上。

pH 对实验的影响:称取 0.04 g 高岭土样品于离心管中,分别加入 7.2 mL pH 为 2、4、5、6、8、10 的去离子水和 0.8 mL U(VI) 标液,剩余步骤同上。

离子种类对实验的影响:称取 0.04 g 高岭土样品于离心管中,分别加入 7.2 mL 浓度为 0.1 mol·L<sup>-1</sup> 的 NaCl、MgCl<sub>2</sub>、KCl、NaHCO<sub>3</sub>、NaNO<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液和 0.8 mL U(VI) 标液,剩余步骤同上。

腐殖酸对实验的影响:称取 0.04 g 高岭土样品于离心管中,同时分别称取 0 mg、0.4 mg、0.8 mg、1.6 mg、3.2 mg、4.8 mg、6.4 mg 的腐殖酸于离心管中,加入 7.2 mL 超纯水和 0.8 mL U(VI) 标液,调节溶液 pH 为 5,剩余步骤同上。

#### 1.2.4 高岭土吸附 U(VI) 前后表征

红外光谱分析:分别取 1 g 吸附 U(VI) 前后的高岭土充分研磨,再加入 100 mg 在红外烤灯下干燥过的 KBr 粉末,继续研磨至混合均匀,再压片,放入红外光谱仪,测定吸附前后的红外吸收光谱。

X 射线荧光光谱分析:称取 4~5 g 的高岭土研磨成粉末状,用 X 射线荧光光谱仪进行测定,测得高岭土的主要成分。

## 2 结果与讨论

### 2.1 高岭土的红外光谱分析

由图 1 可以看出,高岭土在吸附铀(VI)前后的红外光谱变化不大,只有部分峰位发生了变化。高岭土的主要吸收光谱在 3 800~3 000 cm<sup>-1</sup> 和 1 100~900 cm<sup>-1</sup> 的两个波段。第一个波段出现的是 OH 键的吸收带, Si-OH 键伸缩振动,峰值由 3 432.35 cm<sup>-1</sup> 变化成 3 429.21 cm<sup>-1</sup>;第二个波段出现的是 Si-O 键

的吸收带<sup>[12]</sup>, Si-O 键面内伸缩振动,峰值由 1 030.51 cm<sup>-1</sup> 变化成 1 031.37 cm<sup>-1</sup>。在 778 cm<sup>-1</sup> 处为 Si-O-Al 的弯曲振动吸收峰,在 469 cm<sup>-1</sup> 处为 Si-O-Si 的弯曲振动吸收峰。

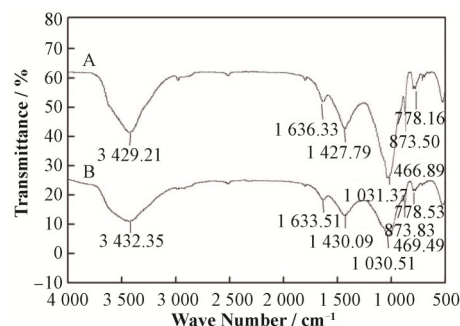


图1 高岭土吸附 U(VI) 前后红外光谱图  
A. 吸附后, B. 吸附前

Fig.1 Infrared spectrum before and after adsorption of kaolin on U(VI)

A. After adsorption, B. Before adsorption

### 2.2 高岭土的 X 射线荧光特征分析

用 X 射线荧光光谱仪测得高岭土的化学成分,结果如表 1 所示。高岭土的化学成分可以作为判定化学性质是否稳定的依据,具有稳定化学性质的高岭土可以有效地阻碍放射性元素的迁移。由表 1 可知, SiO<sub>2</sub>、CaO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为高岭土的主要组成部分,其中还含有 Fe、K、Mg、Na、Ti 等元素。与红外光谱中的 Si-O 键、Si-O-Si 键、Si-O-Al 键等相对应。

表 1 高岭土的化学组成成分(%)  
Table 1 Chemical composition of kaolin (%)

| Element | SiO <sub>2</sub>              | CaO   | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | MgO              | Na <sub>2</sub> O | TiO <sub>2</sub>  |
|---------|-------------------------------|-------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| Wt(%)   | 51.50                         | 19.96 | 15.09                          | 5.92                           | 2.78             | 2.67             | 0.89              | 0.73              |
| Element | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | BaO   | MnO                            | SO <sub>3</sub>                | SrO              | ZrO <sub>2</sub> | Cl                | Rb <sub>2</sub> O |
| Wt(%)   | 0.12                          | 0.10  | 0.10                           | 0.05                           | 0.02             | 0.02             | 0.02              | 0.02              |

### 2.3 不同因素对高岭土吸附 U(VI) 的影响

#### 2.3.1 反应时间对 U(VI) 在高岭土上吸附特征的影响

反应时间对 U(VI) 在高岭土上吸附特征的影响如图 2 所示。由图 2 可知,随着反应时间的增加,高岭土吸附铀的分配系数  $K_d$  在增大,直到达到平衡状态。在刚开始的 6 h 中,  $K_d$  随时间的增加在增大,在 6 h 后,  $K_d$  逐渐趋于稳定。因为在开始反应时,高岭土表面有大量的吸附位点,吸附铀(VI) 较快。在吸附了大量的铀(VI) 后,高岭土表面还能吸附的位点减少,直至达到吸附平衡。之后实验中的平衡时间为 6 h。

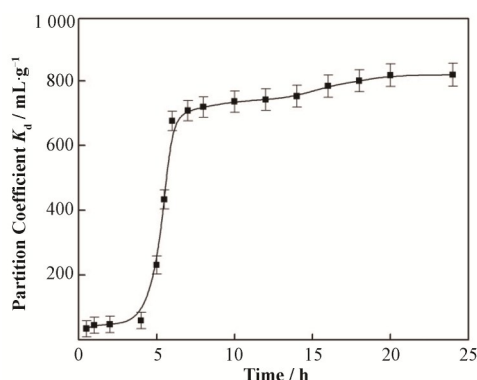


图2 反应时间对吸附特征的影响  
Fig.2 Effect of reaction time on adsorption characteristics

### 2.3.2 初始浓度对U(VI)在高岭土上吸附特征的影响

初始浓度对U(VI)在高岭土上吸附特征的影响如图3所示。由图3可知,随着初始浓度的增大,高岭土吸附铀的分配系数 $K_d$ 先增大再减小,吸附效果最好的初始浓度为 $60\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。因为刚开始高岭土的吸附位点较多,能吸附溶液中较多的铀(VI),在吸附了大量的铀(VI)后达到饱和。高岭土表面的吸附位点一定,随着铀(VI)浓度的增加,达到饱和后,过量的铀(VI)不能被吸附,在溶液中以离子的形式存在,导致 $K_d$ 逐渐减小。

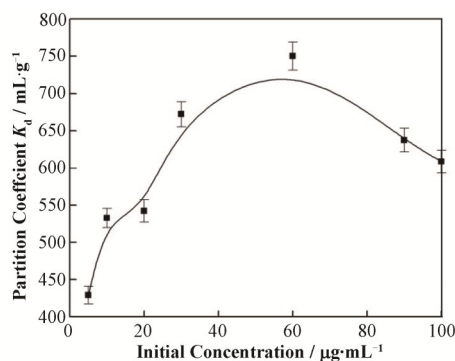


图3 初始浓度对吸附特征的影响  
Fig.3 Effect of initial concentration on adsorption characteristics

### 2.3.3 吸附剂质量对U(VI)在高岭土上吸附特征的影响

吸附剂质量对吸附特征的影响如图4所示。由图4可知,随着吸附剂质量的增加,高岭土吸附铀的分配系数 $K_d$ 逐渐减小。主要是因为吸附剂的投加量增大,其比表面积和吸附位点会增加,而铀(VI)的浓度不变。一定量的高岭土在吸附了大量的铀(VI)后,溶液中铀(VI)的浓度很小,过量的高岭土不会再起到吸附作用。根据分配系数 $K_d$ 的公式,其他因素一定,随着高岭土质量的增加, $K_d$ 就会减小。

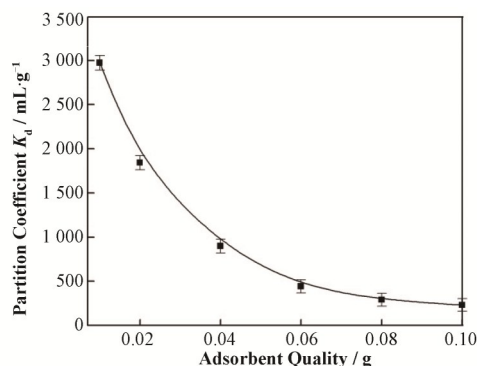


图4 吸附剂质量对吸附特征的影响  
Fig.4 Effect of adsorbent quality on adsorption characteristics

### 2.3.4 pH对U(VI)在高岭土上吸附特征的影响

pH对吸附特征的影响如图5所示。由图5可知,高岭土吸附铀受pH的影响比较明显,pH不仅影响铀的化学形态,还影响高岭土表面吸附官能团的性质<sup>[13]</sup>。pH在2~5之间时, $K_d$ 缓缓地增大,这可能是在低pH下大量的 $\text{H}^+$ 参与U(VI)的竞争吸附,增加了吸附剂与 $[\text{UO}_2(\text{OH})]^+$ 、 $\text{UO}_2^{2+}$ 的静电斥力,吸附率较低;pH在5~10之间时, $K_d$ 呈减小趋势,U(VI)主要以负离子 $[\text{UO}_2(\text{OH})_3]^-$ 的形式存在。当pH=5时,U(VI)主要以 $[\text{UO}_2(\text{OH})]^+$ 的形式存在<sup>[14]</sup>, $K_d$ 达到最大值。这与王晓丽<sup>[15]</sup>U(VI)和Th(VI)在高岭土上的吸附行为研究中的最佳pH约为5.3相似。

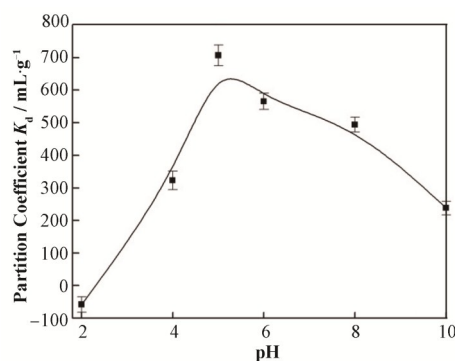


图5 pH对吸附特征的影响  
Fig.5 Effect of pH value on adsorption characteristics

### 2.3.5 离子种类对U(VI)在高岭土上吸附特征的影响

地下水及高岭土中存在的 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 等离子会影响高岭土吸附铀。不同离子对吸附特征的影响如图6所示。由图6可知, $\text{K}^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Na}^+$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 对铀(VI)的吸附影响较小, $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 和 $\text{HCO}_3^-$ 对铀(VI)的吸附有较强抑制效果。主要是 $\text{Mg}^{2+}$ 和溶液中的离子在高岭土表面形成络合物,阻碍了吸附<sup>[16]</sup>;U(VI)和 $\text{CO}_3^{2-}$ 形成了稳定的络合物,阻碍了铀酰络合物与吸附剂的结合,并且 $\text{CO}_3^{2-}$ 还能与 $\text{UO}_2^{2+}$ 形成 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$ 等配合物<sup>[17]</sup>,不利于对铀(VI)的吸附;阳离子会在高岭土表面和铀(VI)竞争吸附,且离子半径越大越容易在高岭土表面吸附, $\text{Mg}^{2+}$ 较 $\text{Na}^+$ 和 $\text{K}^+$ 吸附能力更大,阻碍了铀(VI)的吸附。张虹等<sup>[17]</sup>研究温度对U(VI)在高岭土上的吸附影响中, $\text{Ca}^{2+}$ 对吸附的抑制效果强于 $\text{Mg}^{2+}$ 。是因为 $\text{Ca}^{2+}$ 能够与高岭土中 $\text{CO}_3^{2-}$ 等阴离子反应,生成物在表面阻止活性位点与 $\text{UO}_2^{2+}$ 结合, $\text{CO}_3^{2-}$ 对吸附有较强抑制效果。

### 2.3.6 腐殖酸质量对U(VI)在高岭土上吸附特征的影响

腐殖酸质量对吸附特征的影响如图7所示。由

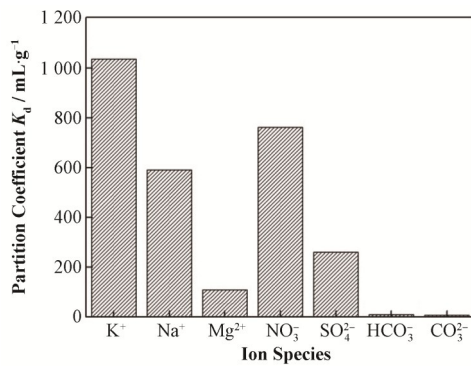


图6 不同离子对吸附特征的影响

Fig.6 Effect of different ions on adsorption characteristics

图7可知,随着腐殖酸质量的增加, $K_d$ 在逐渐减小,加入腐殖酸会抑制对铀(VI)的吸附。因为腐殖酸对U(VI)具有很强的吸附作用,较少的腐殖酸加入就对铀有很好的吸附效果<sup>[18]</sup>。当腐殖酸加入量为0.1 mg时,分配系数 $K_d$ 就已经达到了最大值。U(VI)的浓度一定,再加入过量的腐殖酸将不会起到吸附作用, $K_d$ 将会减小。

### 2.3.7 U(VI)在高岭土上的吸附动力学模型

可以用准一级动力学和准二级动力学方程来描述U(VI)在高岭土上的吸附动力学过程<sup>[19]</sup>,以动力学理论为基础来探讨铀的吸附过程。

U(VI)在高岭土上吸附的准一级动力学线性模型:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (2)$$

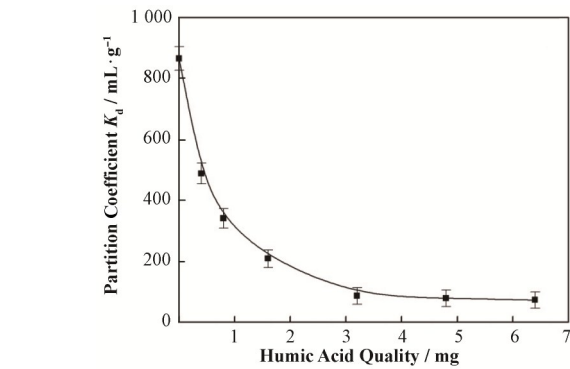
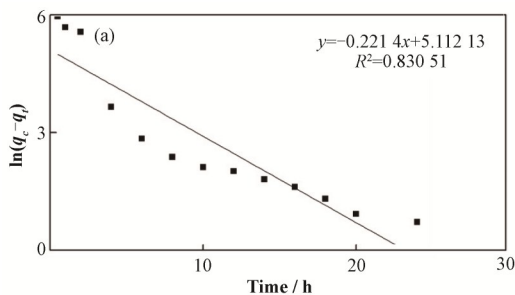


图7 腐殖酸质量对吸附特征的影响

Fig.7 Effect of humic acid quality on adsorption characteristics

U(VI)在高岭土上吸附的准二级动力学线性模型:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (3)$$

式中: $q_t$ 是在相应时间 $t$ 时铀在高岭土上的吸附量, $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ;  $q_e$ 是吸附反应后的平衡吸附量, $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ;  $k_1$ 是准一级动力学的吸附速率常数, $\text{h}^{-1}$ ;  $k_2$ 是准二级动力学的吸附速率常数, $\text{g}\cdot(\mu\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 。准一级动力学准二级动力学拟合结果如图8(a)、(b)所示。由图8可知,两个相关系数 $R^2$ 分别是0.830 51和0.994 19,可以看出准二级动力学方程的相关系数 $R^2$ 更接近于1,这说明准二级动力学方程比准一级动力学方程更好地拟合高岭土吸附铀(VI)的过程。

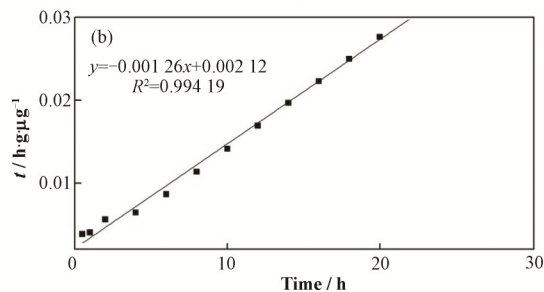


图8 高岭土吸附铀的准一级(a)和准二级(b)动力学

Fig.8 Quasi-first-order (a) and quasi-secondary (b) kinetics of kaolin adsorption of uranium

## 3 结语

本文采用静态吸附的方法研究了高岭土对铀(VI)的吸附性能,结果表明:

1) 高岭土对铀(VI)的吸附性能较好,吸附平衡时间较短,在6 h时就达到了平衡。准二级动力学方程能更好地描述高岭土吸附铀(VI)过程。最佳初始浓度为 $60 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ ,最佳吸附剂质量为0.01 g。

2) pH对高岭土吸附铀(VI)的影响较大。pH在2~5之间时,吸附效率逐渐增大;pH为5时,吸附效

率最大;pH>5,在5~10之间时,吸附效率减小。铀(VI)的化学形态和高岭土表面吸附官能团的性质都会受pH的影响,从而影响吸附效率。

3) 不同的离子对高岭土吸附铀(VI)的影响不同。 $\text{K}^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Na}^+$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 对铀(VI)的吸附影响较弱, $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 和 $\text{HCO}_3^-$ 对铀(VI)的吸附有抑制效果,主要是形成的络合物的影响。

4) 腐殖酸的加入,随着加入质量的增加,对吸附效果的抑制也在增加。

## 参考文献

- Liu Y, Yuan L, Yuan Y, *et al.* A high efficient sorption of U(VI) from aqueous solution using amino-functionalized SBA-15[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2012, **292**(2): 803–810. DOI: 10.1007/s10967-011-1515-y.
- Yu S J, Wang X X, Tan X L, *et al.* High sorption of U(VI) on graphene oxides studied by batch experimental and theoretical calculations[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, **2**(7): 593. DOI: 10.1016/j.cej.2015.11.066.
- Zhang R, Chen C L, Li J, *et al.* Preparation of montmorillonite@carbon composite and its application for U(VI) removal from aqueous solution[J]. *Applied Surface Science*, 2015, **349**: 129–137. DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.04.222.
- 周旭, 曾可, 张瑞荣, 等. Sr在粉质粘土上的吸附比研究[J]. *核电子学与探测技术*, 2013, **33**(3): 301–304. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2013.03.008.  
ZHOU Xu, ZENG Ke, ZHANG Ruirong, *et al.* Study on adsorption ratio of Sr on silty clay[J]. *Nuclear Electronics and Detection Technology*, 2013, **33**(3): 301–304. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2013.03.008.
- 康逢福, 樊立静. 吸附法处理含铀废水研究进展[J]. *现代盐化工*, 2018, **45**(05): 100–101. DOI: CNKI:SUN:SYKZ.0.2018-05-046.  
KANG Fengfu, FAN Lijing. Research progress in the treatment of uranium-containing wastewater by adsorption method[J]. *Modern Salt Chemicals*, 2018, **45**(05): 100–101. DOI: CNKI:SUN:SYKZ.0.2018-05-046.
- Morrison S J, Metzler D R, Carpen-ter C E. Uranium precipitation in a permeable reactive barrier by progressive irreversible dissolution of zerovalent iron[J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(2): 385–390. DOI: 10.1021/es001204i.
- Cao Q, Liu Y, Wang C, *et al.* Phosphorusmodified poly(styrene-co-divinylbenzene)-pamam chelating resin for the adsorption of uranium(VI) in aqueous[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **263**: 311–321. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2013.05.039.
- 卢嘉伟, 苏伟, 谢华. 地质特种水泥对模拟含铀废液的静态吸附动力学研究[J]. *核技术*, 2017, **40**(9): 090501. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.090501.  
LU Jiawei, SU Wei, XIE Hua. Static adsorption kinetics of simulated uranium-containing waste liquid by geological special cement[J]. *Nuclear Techniques*, 2017, **40**(9): 090501. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.090501.
- 关文斌, 赵彬侠, 邱爽, 等. Cr(VI)在改性蒙脱土上吸附行为的研究[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2016, **46**(3): 375–380. DOI: 10.16152/j.cnki.xdxbzr.2016-03-013.  
GUAN Wenbin, ZHAO Binxia, QIU Shuang, *et al.* Adsorption behavior of Cr(VI) on modified montmorillonite[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science)*, 2016, **46**(3): 375–380. DOI: 10.16152/j.cnki.xdxbzr.2016-03-013.
- 卢国声, 周敏娟, 胡立. 铀在亚粘土中的吸附性能研究[J]. *四川有色金属*, 2012, (02): 40–44. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4079.2012.02.010.  
LU Guosheng, ZHOU Minjuan, HU Li. Study on adsorption properties of uranium in subclay[J]. *Sichuan Nonferrous Metals*, 2012, (02): 40–44. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4079.2012.02.010.
- 岳萍, 虞先国, 宿吉龙, 等.  $^{239}\text{Pu}$ 在膨润土中的吸附和迁移实验研究[J]. *科学技术与工程*, 2014, **14**: 168. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2014.08.031.  
YUE Ping, TUO Xianguo, SU Jilong, *et al.* Experimental study on adsorption and migration of  $^{239}\text{Pu}$  in bentonite[J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, **14**: 168. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2014.08.031.
- 代长禄, Etsugo Kato. 高岭土矿物的红外研究[J]. *河北陶瓷*, 1978, (03): 1–14.  
DAI Changlu, Etsugo Kato. Infrared study of kaolin minerals[J]. *Hebei Ceramics*, 1978, (03): 1–14.
- 赖捷, 刘畅, 冷阳春, 等. 粘土岩对铀(VI)的吸附特征研究[J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2017, **54**(04): 815–821. DOI: CNKI:SUN:SCDX.0.2017-04-025.  
LAI Jie, LIU Chang, LENG Yangchun, *et al.* Study on the adsorption characteristics of uranium(VI) by clay rock[J]. *Journal of Sichuan University (Natural Science Edition)*, 2017, **54**(04): 815–821. DOI: CNKI:SUN:SCDX.0.2017-04-025.
- 凌辉, 唐振平, 谢水波, 等. 铁负载膨润土对铀(VI)的吸附特性及机理研究[J]. *南华大学学报(自然科学版)*, 2014, (3): 26–32. DOI: 10.3969/j.issn.1673-0062.2014.03.007.  
LING Hui, TANG Zhenping, XIE Shuibao, *et al.* Adsorption characteristics and mechanism of iron-loaded bentonite on uranium(VI) [J]. *Journal of Nanhua University (Natural Science Edition)*, 2014, (3): 26–32. DOI: 10.3969/j.issn.1673-0062.2014.03.007.
- 王晓丽. U(VI)和Th(IV)在高岭土上的吸附行为研究

- [D]. 成都: 中国工程物理研究院, 2016.
- WANG Xiaoli. Adsorption behavior of U(VI) and Th(IV) on kaolin[D]. Chengdu: China Academy of Engineering Physics, 2016.
- 16 杜作勇, 王彦惠, 李东瑞, 等. 膨润土对 U(VI) 的吸附机理研究[J]. 核技术, 2019, 42(2): 020301. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.020301.
- DU Zuoyong, WANG Yanhui, LI Dongrui, *et al.* Study on the adsorption mechanism of bentonite for U(VI) [J]. Nuclear Techniques, 2019, 42(2): 020301. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.020301.
- 17 张虹, 冷阳春, 王彦惠, 等. 温度对 U(VI) 在高岭土上的吸附影响[J]. 核技术, 2018, 41(7): 070302. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.070302.
- ZHANG Hong, LENG Yangchun, WANG Yanhui, *et al.* Effect of temperature on the adsorption of U(VI) on kaolin [J]. Nuclear Techniques, 2018, 41(7): 070302. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.070302.
- 18 曾江萍, 安树清, 徐铁民, 等. 腐殖酸对 U(VI) 的吸附性能研究[J]. 地质学报, 2016, 90(12): 3563–3569. DOI: 10.3969/j.issn.0001-5717.2016.12.021.
- ZENG Jiangping, AN Shuqing, XU Tiemin, *et al.* Study on the adsorption properties of humic acid for U(VI) [J]. Journal of Geology, 2016, 90(12): 3563–3569. DOI: 10.3969/j.issn.0001-5717.2016.12.021.
- 19 宋文玉, 降青梅, 刘亚东, 等. 铬(III)离子催化铈(IV)离子氧化异丁醇的反应动力学及机理[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2004, 24(6): 594–599. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1565.2004.06.008.
- SONG Wenyu, JIANG Qingmei, LIU Yadong, *et al.* Kinetics and mechanism of oxidation of isobutanol by cerium (IV) ion catalyzed by chromium(III) ions[J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition), 2004, 24(6): 594–599. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1565.2004.06.008.