

伊利石和高岭石对 U(VI) 的吸附

杜作勇¹, 冷阳春¹, 卫纯纯¹, 赵玉婷¹, 李东瑞¹, 王彦惠¹, 庾先国^{2,*}

1. 西南科技大学 核废物与环境安全国防重点学科实验室, 四川 绵阳 621010;

2. 四川轻化工大学, 四川 自贡 643000

摘要:以伊利石和高岭石为吸附剂,通过静态吸附法研究了其对 U(VI)的吸附特性。考察了接触时间、初始浓度、吸附剂质量、pH、温度、离子种类、腐殖酸等对其吸附效果的影响;采用红外光谱 (FTIR) 对伊利石和高岭石的结构进行了表征。研究表明:伊利石和高岭石对 U(VI)具有很强的吸附能力,在 10 h、铀初始质量浓度为 30 mg/L、吸附剂质量为 0.04 g、pH=5 的条件下,伊利石对 U(VI)的吸附效果最好;在 12 h、铀初始质量浓度为 30 mg/L、吸附剂质量为 0.01 g、pH=5 的条件下,高岭石对 U(VI)的吸附效果最好;随着温度的升高,伊利石和高岭石对 U(VI)的吸附能力不断增强,尤其是伊利石;溶液中 Mg^{2+} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 显著降低了伊利石和高岭石对 U(VI)的吸附效果;随着腐殖酸浓度的增加,伊利石对 U(VI)的吸附能力提高,高岭石对 U(VI)的吸附能力降低。

关键词:伊利石;高岭石;U(VI);吸附

中图分类号:TL941 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9950(2019)05-0503-06

doi:10.7538/hhx.2019.YX.2019031

Adsorption of Illite and Kaolinite for U(VI)

DU Zuo-yong¹, LENG Yang-chun¹, WEI Chun-chun¹, ZHAO Yu-ting¹,
LI Dong-rui¹, WANG Yan-hui¹, TUO Xian-guo^{2,*}

1. Laboratory of National Defense for Radioactive Waste and Environmental Security,

Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;

2. Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China

Abstract: The adsorption behavior of U(VI) on illite and kaolinite was studied as a function of adsorption time, initial concentration of U(VI), adsorbent mass, pH, temperature, the type of ionic species and humic acid by the static experimental method; the structure of the illite and kaolinite were characterized by FTIR. The experimental results display that the illite have the best adsorption effect on U(VI) at the initial mass concentration of 30 mg/L, adsorbent mass of 0.04 g, 10 h and pH=5; the kaolinite have the best adsorption effect on U(VI) at the initial mass concentration of 30 mg/L, adsorbent mass of 0.01 g, 12 h and pH=5; the adsorption capacity of illite and kaolinite is enlarged with the increasing of tem-

收稿日期:2019-03-13; **修订日期:**2019-06-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41630646);国家自然科学基金青年基金资助项目(41603124)

作者简介:杜作勇(1994—),男,四川泸州人,硕士研究生,环境工程专业,E-mail: 313855652@qq.com

* **通信联系人:**庾先国(1966—),男,湖南澧县人,教授,主要从事核技术应用研究,E-mail: tuoxg@cduet.edu.cn

网络出版时间:2019-09-19; **网络出版地址:**http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2045.TL.20190917.1732.002.html

perature, especially illite. Mg^{2+} , CO_3^{2-} and HCO_3^- in solution significantly reduce the adsorption of U(VI) by illite and kaolinite; with the increase of humic acid, the adsorption capacity of illite improves, but the adsorption capacity of kaolinite decreases.

Key words: illite; kaolinite; U(VI); adsorption

放射性核素的迁移行为是核设施退役治理和放射性处置库安全评价的重要内容,研究放射性核素在不同岩石、土壤介质中的迁移特征,对核设施退役治理安全评审和放射性处置库安全评价具有重要意义^[1-2]。近几十年来,国内外专家针对放射性核素在地质环境中的迁移行为进行了大量的研究,广泛研究了各类黏土矿物和各种因素对核素迁移的影响特征^[3-5]。当前世界各国对高放废物的处理主要采用人工屏障和地质屏障双重保护的“深层地质处置”方法,以确保安全^[6]。铀作为高放废物中的主要元素,具有放射性强、毒性大、释热量高等特点,不能用一般的物理、化学或生物方法使其消除,一旦进入生物圈,危害极大。

黏土矿物是一种很好的吸附材料,可以吸附水溶液中的铀,阻滞地下水中铀溶液在土壤介质中的迁移^[7]。在我国,关于黏土矿物对铀的吸附已有一定的研究,如蒙脱石和膨润土,熊正为等^[8]在对蒙脱石吸附铀进行研究时发现溶液 pH 值在 5~6 时吸附效果最好。刘艳等^[9]对铀在膨润土上的吸附行为进行研究,发现膨润土对铀的吸附量随铀初始浓度的升高而增大,吸附分配系数与吸附率随铀初始浓度的升高而逐渐降低。但是,目前关于黏土矿物对铀的吸附在国内的研究仍不全面,有关高岭石、伊利石对铀的吸附研究更少。伊利石和高岭石作为自然界常见的黏土矿物,具有较大的比表面积、离子交换能力强且具有相对简单的晶体结构等性质,也被用来吸附水溶液中的放射性污染物^[10-11]。本工作拟通过静态吸附实验,研究伊利石和高岭石对 U(VI) 的吸附能力,以对我国放射性废水的处理工作起重要作用。

1 实验部分

1.1 仪器和试剂

CP214 型电子天平,精度 0.000 1 g,美国奥豪斯公司;UV-3150 紫外可见-近红外分光光度计,日本岛津公司;Nicolet-5700 红外吸收光谱仪,美国尼高力公司;202 电热恒温干燥箱,北京中兴伟业;CHA-SA 气浴恒温振荡器,金坛科析仪器公司;UPT-11-10T 型超纯水机,四川优普超

纯科技有限公司;PHS-3E pH 计,上海仪电科学仪器股份有限公司。

八氧化三铀,分析纯,核工业北京化工冶金研究院;伊利石和高岭石,购于上海市奉贤奉城试剂厂,过 200 目筛后密封保存;腐殖酸,分析纯,天津市光复精细化工研究所;盐酸(HCl,纯度为 37%)、氢氧化钠(NaOH,纯度为 96%),成都瑞龙化学有限责任公司;其他试剂均为市售分析纯。

U(VI) 储备液的配制:称取 0.589 6 g U_3O_8 于 100 mL 烧杯中,加入 6 mL 盐酸,10 mL 过氧化氢和 0.5 mL 硝酸,盖上表面皿于加热套上加热,直至完全溶解,定容至 500 mL 容量瓶中,得到 1.0 g/L U(VI) 储备液。

1.2 伊利石和高岭石吸附 U(VI) 的红外表征

分别取 1 mg 吸附 U(VI) 前后的伊利石与 100 mg KBr 充分混匀、压片,放入光谱仪,测定其红外吸收光谱;高岭石的测定采用同样的方法。

1.3 静态吸附实验

在一系列 10 mL 离心管中,加入一定量吸附剂和 7.2 mL 去离子水,再加入 0.8 mL 300 mg/L 的铀溶液,封闭管口,连续振荡一定时间,以 4 000 r/min 离心分离,移取一定量的上清液测定 U(VI) 浓度^[12]。每组实验均做了 3 组平行实验。吸附分配系数 K_d 计算公式如下^[13]:

$$K_d = \frac{\rho_0 - \rho_t}{\rho_t} \times \frac{V}{m} \quad (1)$$

式中: K_d , 吸附分配系数, mL/g; ρ_0 、 ρ_t 分别为吸附前后 U(VI) 的质量浓度, mg/L; V 为溶液的总体积, mL; m 为伊利石或高岭石质量, g。

1.3.1 接触时间对吸附的影响 在一系列 10 mL 离心管中,加入 0.04 g 吸附剂材料和 7.2 mL 去离子水,再加入 0.8 mL 300 mg/L 的铀溶液,密封管口,在 25 °C、pH=5 的条件下连续振荡 24 h,每隔一段时间取出离心管,离心后吸取上清液 1 mL 测定吸附后 U(VI) 的浓度。

1.3.2 U(VI) 初始浓度对吸附的影响 称取吸附剂材料 7 份,每份 0.04 g,分别放入 7 个 10 mL 的离心管中,然后分别向离心管中加入一定的纯水和铀溶液,使其中的 U(VI) 质量浓度分别

为 10、20、30、40、60、80、100 mg/L,密封管口,在 25 °C、pH=5 的条件下振荡一定时间,测定吸附后 U(VI)的浓度。

1.3.3 吸附剂质量对吸附的影响 分别称取 0.01、0.02、0.04、0.06、0.08、0.10 g 的吸附剂材料放入 6 个 10 mL 离心管中,分别加入 7.2 mL 去离子水,再加入 0.8 mL 300 mg/L 的铀溶液,密封管口,在 25 °C、pH=5 的条件下振荡一定时间,测定吸附后 U(VI)的浓度。

1.3.4 pH 对吸附的影响 在 6 个 10 mL 离心管中,加入 0.04 g 吸附剂材料和 7.2 mL 去离子水,再加入 0.8 mL 300 mg/L 的铀溶液,通过 HCl 和 NaOH 调节 pH 为 2、4、5、6、8、10,密封管口,在 25 °C 的条件下振荡一定时间,测定吸附后 U(VI)的浓度。

1.3.5 温度对吸附的影响 在 6 个 10 mL 离心管中,加入 0.04 g 吸附剂材料和 7.2 mL 去离子水,再加入 0.8 mL 300 mg/L 的铀溶液,调节温度为 25、30、35、40、45、50 °C,密封管口,在 pH=5 的条件下振荡一定时间,测定吸附后 U(VI)的浓度。

1.3.6 阴阳离子对吸附的影响 在 6 个 10 mL 离心管中,加入 0.04 g 吸附剂材料和 7.2 mL 0.1 mol/L NaCl、KCl、MgCl₂、Na₂SO₄、NaNO₃、Na₂CO₃、NaHCO₃ 溶液,再加入 0.8 mL 300 mg/L 的铀溶液,密封管口,在 25 °C、pH=5 的条件下振

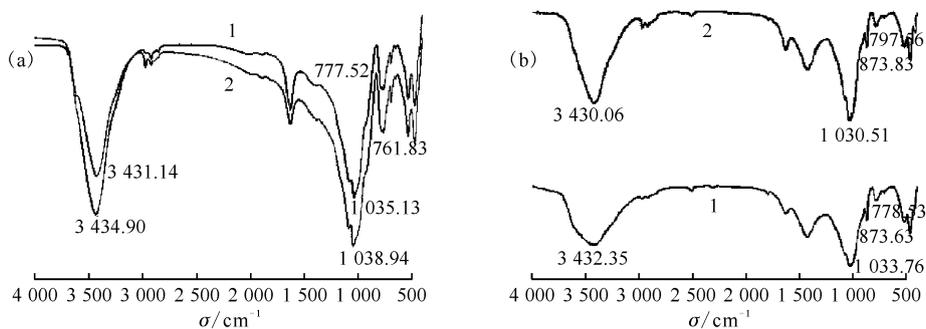
荡一定时间,测定吸附后 U(VI)的浓度。

1.3.7 腐殖酸浓度对吸附的影响 调节溶液中腐殖酸质量浓度为 0、0.05、0.10、0.20、0.40、0.60、0.80 g/L,其余步骤同 1.3.6 节处理。

2 结果和讨论

2.1 伊利石和高岭石的红外光谱

吸附前后伊利石和高岭石的红外光谱(FTIR)示于图 1。由图 1(a)可知:伊利石吸附 U(VI)后的光谱与吸附前相比有明显差别,某些谱峰明显改变,而且发生了位移,部分—OH 中的氢被 U(VI)所取代,导致—OH 的波数由 3 434.90 cm⁻¹移至 3 431.14 cm⁻¹,1 035.13 cm⁻¹的吸收峰为 Si—O—R 伸缩振动峰,777.52 cm⁻¹的吸收峰为 Al—O 键面内振动峰,吸附 U(VI)后仅发生了位移,峰形和峰强并没发生太大改变,这与崔瑞萍等^[14]的研究基本一致。由图 1(b)可知:高岭石吸附 U(VI)后的光谱与吸附前相比并没有太大变化,无新的谱带生成,说明吸附 U(VI)后自身结构并未发生太大变化;3 432.35 cm⁻¹的 R—OH 伸缩振动峰由于和铀发生交换反应,移动了约 2 cm⁻¹,峰形和峰强发生了变化;1 033.76 cm⁻¹是由 Si—O 伸缩振动引起,873.63 cm⁻¹和 778.53 cm⁻¹的吸收峰分别由 Si—O、Si—Si 的伸缩振动引起^[15]。



1——吸附前,2——吸附后

图 1 吸附前后伊利石(a)和高岭石(b)的红外光谱

Fig. 1 IR spectrum analysis before and after of illite(a) and kaolinite(b)

2.2 接触时间对 U(VI)吸附的影响

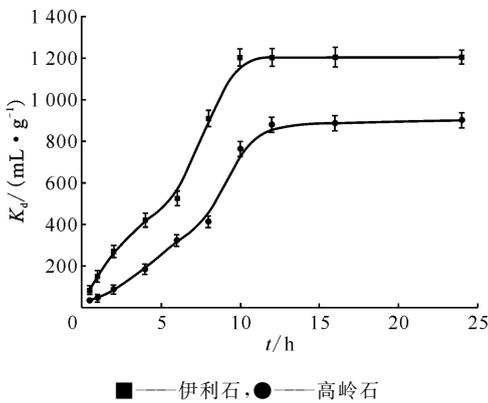
接触时间对 U(VI)吸附的影响示于图 2。由图 2 可知:随着接触时间的增加,伊利石和高岭石的吸附分配系数逐渐增大,当时间达到 10 h 和 12 h 时,两者的吸附分配系数变化不大,说明此时吸附基本达到平衡。在 10 h 之前,两者的吸附分

配系数增长较快,这是因为起初时伊利石和高岭石表面有大量的吸附位点,并且在溶液中的分散程度较高,以至于能够使更多的铀离子吸附在其表面。随着时间的推移,伊利石和高岭石表面的吸附位点趋于饱和,吸附达到平衡。后续实验分别选择 10 h 和 12 h 为伊利石和高岭石的最佳吸

附时间。

2.3 U(VI)初始质量浓度对U(VI)吸附的影响

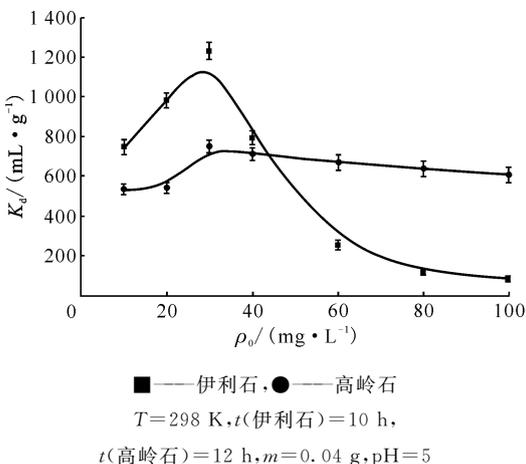
U(VI)初始质量浓度对U(VI)吸附的影响示于图3。由图3可知,随着U(VI)初始质量浓度的增加,伊利石和高岭石的吸附分配系数均呈先增加后减小的趋势,伊利石和高岭石的最大吸附分配系数均在U(VI)初始质量浓度为30 mg/L处获得。当U(VI)的初始浓度较低时,少量的U(VI)快速地被吸附在吸附剂表面;随着U(VI)浓度的增加,吸附剂对U(VI)的吸附达到饱和,过量的U(VI)以游离状态存在于溶液中,使 K_d 值下降。



$T=298\text{ K}, \rho_0=30\text{ mg/L}, m=0.04\text{ g}, \text{pH}=5$

图2 接触时间对U(VI)吸附的影响

Fig. 2 Effect of contact time on adsorption of U(VI)



$T=298\text{ K}, t(\text{伊利石})=10\text{ h},$

$t(\text{高岭石})=12\text{ h}, m=0.04\text{ g}, \text{pH}=5$

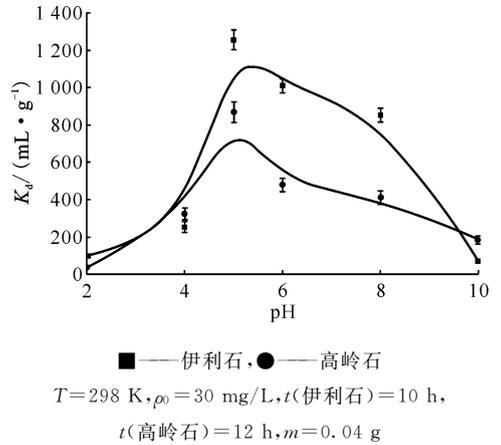
图3 U(VI)初始质量浓度对U(VI)吸附的影响

Fig. 3 Effect of initial U(VI) mass concentration on U(VI) adsorption

2.4 pH对U(VI)吸附的影响

pH对U(VI)吸附的影响示于图4。由图4可知:在 $\text{pH}=2\sim 5$ 时,随着pH的减小, K_d 值也随之减小,这是因为当pH较小时,溶液中的

H^+ 含量较多,容易和水溶液中的铀酰离子形成竞争吸附;当 $\text{pH}=5$ 时, K_d 值达到最大值;而当 $\text{pH}>7$ 后,U(VI)主要以 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$ 、 $\text{UO}_2(\text{OH})_3^-$ 等形式存在于溶液中,同时伴随着微量铀沉淀的生成,这些络合离子与吸附剂表面产生静电斥力使吸附效果变差,溶液中 UO_2^{2+} 较少,不利于吸附的进行^[16]。因此后续实验均在 $\text{pH}=5$ 下进行。



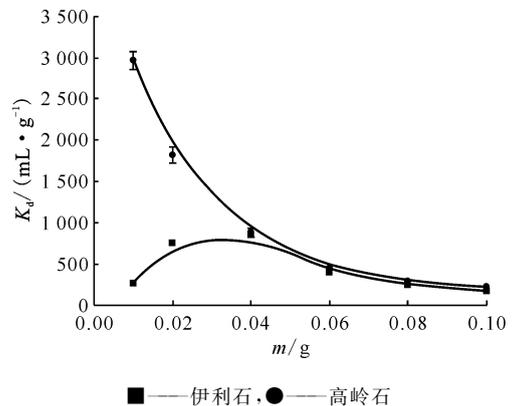
$T=298\text{ K}, \rho_0=30\text{ mg/L}, t(\text{伊利石})=10\text{ h},$
 $t(\text{高岭石})=12\text{ h}, m=0.04\text{ g}$

图4 pH对U(VI)吸附的影响

Fig. 4 Effect of pH value on adsorption of U(VI)

2.5 吸附剂质量对U(VI)吸附的影响

吸附剂质量对U(VI)吸附的影响示于图5。由图5可知,随着伊利石和高岭石投加量的增加,伊利石对U(VI)的吸附分配系数呈先增大后减小的趋势,而高岭石对U(VI)的吸附分配系数一直降低。当投加量为0.04 g时,伊利石对U(VI)的吸附分配系数达到最大值。起初时,伊利石投加量较少,吸附位点少,溶液中的U(VI)快速被吸附



$T=298\text{ K}, \rho_0=30\text{ mg/L}, t(\text{伊利石})=10\text{ h},$
 $t(\text{高岭石})=12\text{ h}, \text{pH}=5$

图5 吸附剂质量对U(VI)吸附的影响

Fig. 5 Effect of adsorbent mass on U(VI) adsorption

到伊利石表面,吸附分配系数增加;而高岭石的 K_d 值降低的原因是高岭石的比表面积更大,吸附位点更多,少量的高岭石也具有大量的吸附位点,过量的高岭石会发生自身的聚合,使高岭石吸附位点减少,有效面积降低。在投加量超过 0.04 g 后,过量的高岭石也由于自身聚合导致 K_d 值降低。

2.6 温度对 U(VI) 吸附的影响

温度对 U(VI) 吸附的影响示于图 6。由图 6 可知:随着温度的增加,伊利石和高岭石的吸附分配系数逐渐增大,说明伊利石和高岭石对 U(VI) 的吸附皆为吸热反应;温度对高岭石对 U(VI) 的吸附影响较小,而对伊利石的吸附影响较大。

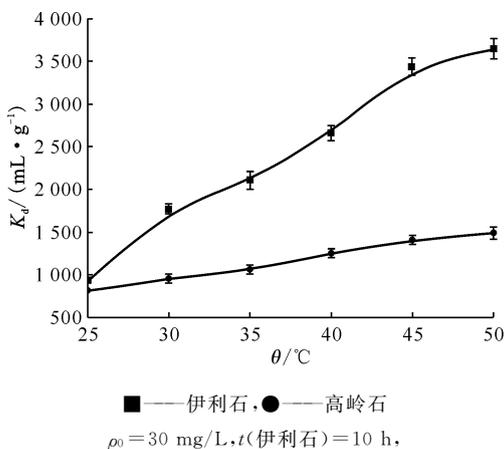


图 6 温度对 U(VI) 吸附的影响

Fig. 6 Effect of temperature on U(VI) adsorption

2.7 离子种类对 U(VI) 吸附的影响

离子种类对 U(VI) 吸附的影响示于图 7。由图 7 可知:在阳离子中, Mg^{2+} 对高岭石和伊利石对 U(VI) 的吸附效果影响较大, Na^+ 影响较小,而 K^+ 基本没影响; Mg^{2+} 降低了对 U(VI) 的吸附效果,这是因为 Mg^{2+} 可以与伊利石和高岭石中的 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 及 OH^- 等形成难溶的络合物^[17],覆盖在吸附剂表面使其不能与溶液中的 U(VI) 结合;在阴离子中, CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 显著降低了伊利石和高岭石对 U(VI) 的吸附效果。这是因为 CO_3^{2-} 在溶液中水解生成的 OH^- 与溶液中的 UO_2^{2+} 形成带负电的 $UO_2(OH)_3^-$ ^[18],同时 CO_3^{2-} 还能与 UO_2^{2+} 形成 $UO_2(CO_3)_3^{4-}$ 等配合物,阻碍了伊利石和高岭石对 U(VI) 的吸附行为。

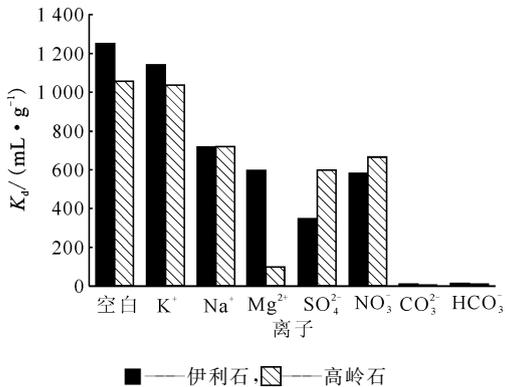


图 7 离子种类对 U(VI) 吸附的影响

Fig. 7 Effect of ionic species on adsorption of U(VI)

2.8 腐殖酸投加量对 U(VI) 吸附的影响

腐殖酸投加量对 U(VI) 吸附的影响示于图 8。由图 8 可知,随着腐殖酸投加量的增加,伊利石对 U(VI) 的吸附能力逐渐增加,而高岭石对 U(VI) 的吸附能力逐渐降低。这是因为腐殖酸结构中的 $-OH$ 、 $-COOH$ 等增加了负电荷的量,提高了伊利石对铀酰离子的吸附^[19],Xiao 等^[20]研究了腐殖酸对 U(VI) 在膨润土上吸附行为的影响,发现在低 pH 下,膨润土表面正电荷减少,而且腐殖酸提供了更多的官能团,增强了膨润土对 U(VI) 的吸附效果。而高岭石吸附效果降低是因为加入腐殖酸后,破坏了高岭石的结构,腐殖酸和高岭石相互凝聚使其表面的吸附位点较少,与铀酰离子形成络合物的能力也被削弱,从而降低了高岭石对 U(VI) 的吸附效果。这与夏良树等^[21]研究红壤胶体对 U(VI) 的吸附及机理的结果基本一致。

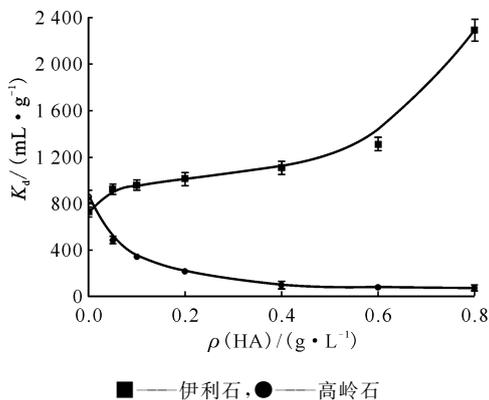


图 8 腐殖酸投加量对 U(VI) 吸附的影响

Fig. 8 Effect of humic acid on U(VI) adsorption

3 结 论

通过静态吸附法研究了不同条件下 U(VI) 在伊利石和高岭石上的吸附行为特性, 并得到以下结论:

(1) 由 FTIR 分析可得, 伊利石吸附 U(VI) 后的光谱与吸附前相比有明显的差别, 缔合一OH、Si—O—R 和 Al—O 为主要的吸附位点; 高岭石吸附 U(VI) 后的光谱与吸附前相比并没有太大变化, 无新的谱带生成, 缔合一OH、Si—O 和 Si—Si 为高岭石主要的官能团。

(2) 伊利石和高岭石对 U(VI) 的吸附较快, 当时间达到 10 h 和 12 h 时, 两者分别达到平衡; 伊利石和高岭石的最大吸附分配系数均在 U(VI) 初始质量浓度为 30 mg/L 处获得, U(VI) 初始浓度对高岭石吸附 U(VI) 的影响不大; pH 对吸附效果的影响较大, pH 在 2~5 时伊利石和高岭石的吸附分配系数 K_d 值上升较快, 当 pH=5 时, 吸附分配系数 K_d 值达到最大值; 随着 pH 继续增加, 吸附分配系数 K_d 值逐渐减小。

(3) 当伊利石和高岭石质量分别为 0.04 g 和 0.01 g 时, 伊利石和高岭石的吸附分配系数达到最大值; 温度对吸附效果的影响较大, 随着温度的增加, 伊利石和高岭石的吸附分配系数逐渐增大, 说明两者皆为吸热反应; 阴阳离子对伊利石和高岭石吸附 U(VI) 的影响差异很大, 溶液中 Mg^{2+} 、 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 显著降低了伊利石和高岭石对 U(VI) 的吸附效果。

参考文献:

- [1] 刘期凤, 刘宁, 廖家莉, 等. 放射性核素迁移研究的现状与进展[J]. 化学研究与应用, 2006, 18(5): 465-471.
- [2] 庾先国, 徐争启, 穆克亮. 放射性核素在不同介质中的迁移研究进展[J]. 物探化探计算技术, 2006, 28(1): 36-40.
- [3] 李丽, 庾先国, 李哲, 等. ^{239}Pu 在板岩和土壤中的吸附[J]. 核化学与放射化学, 2012, 34(1): 60-64.
- [4] 牛智伟, 范桥辉, 潘多强, 等. U(VI) 在 Na-凹凸棒石黏土上的吸附[J]. 核化学与放射化学, 2012, 34(5): 297-304.
- [5] Jing C, Li Y, Cui R, et al. Illite-supported nanoscale zero-valent iron for removal of ^{238}U from aqueous solution: characterization, reactivity and mechanism[J]. J Radioanal Nucl Chem, 2015, 304(2): 859-865.
- [6] 宿吉龙, 庾先国, 冷阳春, 等. 水相环境对 Pu 在高庙子膨润土中吸附行为的影响[J]. 核化学与放射化学, 2013, 35(4): 247-251.
- [7] 李仕友, 谢水波, 王清良, 等. 黏土对废水中铀的吸附性能[J]. 化工环保, 2006, 26(6): 459-462.
- [8] 熊正为, 王清良, 郭成林. 蒙脱石吸附铀机理实验研究[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2007, 30(3): 75-79.
- [9] 刘艳, 易发成, 王哲. 膨润土对铀的吸附研究[J]. 非金属矿, 2010, 33(1): 52-53.
- [10] Benedicto A, Degueldre C, Missana T. Gallium sorption on montmorillonite and illite colloids: experimental study and modelling by ionic exchange and surface complexation[J]. Appl Geochem, 2014, 40: 43-50.
- [11] Missana T, Garcia-Gutierrez M, Alonso U. Sorption of strontium onto illite/smectite mixed clays[J]. Phys Chem Earth, Parts A/B/C, 2008, 33(S): 156-162.
- [12] 杜浪, 李玉香, 马雪, 等. 偶氮胂 III 分光光度法测定微量铀[J]. 冶金分析, 2015, 35(1): 68-71.
- [13] 岳萍, 庾先国, 宿吉龙, 等. ^{239}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(8): 168-171.
- [14] 崔瑞萍, 李义连, 景晨. 伊利石对水溶液中低浓度铀的吸附[J]. 环境化学, 2015, 34(2): 314-320.
- [15] 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.
- [16] 刘勇, 李晖, 张永丽, 等. 羟基铝柱撑蛭石的制备及其吸附磷酸根性能研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2008, 40(4): 80-85.
- [17] 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(4): 815-821.
- [18] Wang Z, Zachara J M, Boily J F, et al. Determining individual mineral contributions to U(VI) adsorption in a contaminated aquifer sediment: a fluorescence spectroscopy study[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 2011, 75(10): 2965-2979.
- [19] 赵媛媛. 典型核素在红壤胶体的吸附性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2018.
- [20] Xiao J, Chen Y, Zhao W, et al. Sorption behavior of U(VI) onto Chinese bentonite: effect of pH, ionic strength, temperature and humic acid[J]. J Mol Liq, 2013, 188(12): 178-185.
- [21] 夏良树, 黄欣, 曹存存, 等. 红壤胶体对 U(VI) 的吸附性能及机理[J]. 原子能科学技术, 2013, 47(10): 1692-1699.