

改性稻秆吸附 U(VI) 的特性研究

肖益群¹, 周彦同¹, 夏良树^{1,*}, 李瑞瑞¹, 李 广²

1. 南华大学 核科学技术学院, 湖南 衡阳 421001;
2. 南华大学 化学化工学院, 湖南 衡阳 421001

摘要:通过静态吸附实验,以稻秆为吸附剂、含 U(VI) 溶液为吸附质,研究了吸附剂改性方法、吸附剂用量、溶液 pH 值、吸附温度等因素对稻秆吸附 U(VI) 效果的影响,探讨了改性稻秆吸附 U(VI) 的热力学、动力学性质。实验结果表明,用 0.5 mol/L NaOH 能够对稻秆进行有效改性,在吸附 pH=4.0、吸附时间为 180 min、改性稻秆投加量为 5~8 g/L、室温条件下,改性稻秆吸附 U(VI) 可达到较好吸附效果,U(VI) 去除率达到 99.72%;但随着铀初始质量浓度的增加,U(VI) 去除率降低。改性稻秆吸附 U(VI) 的热力学过程遵循 Langmuir 等温吸附方程,相关系数 $r^2=0.9899$;改性稻秆吸附 U(VI) 的动力学过程符合准二级动力学方程,相关系数 r^2 达到 0.9992。

关键词:稻秆;改性;铀;吸附

中图分类号:X703.1 文献标志码:A 文章编号:0253-9950(2015)01-0051-07

doi:10.7538/hhx.2015.37.01.0051

Adsorptive Characteristic of U(VI) by Modified Rice Stem

XIAO Yi-qun¹, ZHOU Yan-tong¹, XIA Liang-shu^{1,*}, LI Rui-rui¹, LI Guang²

1. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China;
2. School of Chemistry and Chemical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China

Abstract: Static adsorption experiments were carried out to study the influence of the modifying agents, the amount of rice stem as the adsorbent, pH, temperature, etc. on the adsorption of U(VI). The sorption isotherm equations and the kinetic models were used to fit the experimental data. The results show that the rice stem can be modified effectively by 0.5 mol/L NaOH, and that at the optimum adsorption conditions, i. e. pH=4.0, 180 min of the adsorption time, 5-8 g/L of the amount of adsorbent, the good adsorption behavior is very good with the removal at room temperature. With increases of the initial concentration of U(VI), the removal rate of U(VI) is decreased. Under the best experimental conditions, the removal rate of U(VI) reaches 99.72%. The removal process of U(VI) by using modified rice stem fits to Langmuir isotherm equation and the correlation coefficients r^2 is up to 0.9899. The process of adsorption can be well described by pseudo-second-order model with

收稿日期:2014-06-19;修订日期:2014-12-18

基金项目:湖南省自然科学基金委员会与衡阳市政府自然科学基金联合基金资助项目(14JJ5019);衡阳市科技局资助项目(2012KS10);湖南省高等学校科学研究重点项目(12A120)

作者简介:肖益群(1989—),男,湖南衡阳人,硕士研究生,核燃料循环与材料专业

* 通信联系人:夏良树(1966—),男,湖南衡阳人,博士,教授,从事放射性废物处理与处置研究,E-mail: publicxls@163.com

the relation coefficient to 0.999 2.

Key words: rice stem; modification; uranium; adsorption

随着原子能工业的迅速发展,与之密切相关的放射性废水的产生数量和种类也越来越多。若不对放射性废水进行妥善处理,任其排放,放射性核素就会被植物吸附或动物吸收到体内,从而进入食物链,最终危害人类的健康与生态环境安全;放射性核素进入人体后主要蓄积于内脏和骨骼中,对人体造成损伤,引起慢性中毒并诱发多种疾病^[1-3]。因这些废水中放射性核素的毒性、环境迁移性及它们复杂的化学形态,人们越来越重视废水中铀的去除及回收方面的研究。目前,处理放射性废水的主要传统方法有混凝沉淀法、离子交换法、蒸发浓缩法、膜处理法、萃取法等。这些方法存在工艺复杂、处理繁琐,易造成二次污染等诸多不足^[4-5]。因此,近年来人们一直致力于研究和寻找高效经济的含铀放射性废水处理方法。生物吸附法是一种处理重金属离子污染的新技术,具有材料来源广泛、成本低、处理效率高、可回收重金属等优点,因而具有广阔的应用前景^[6-8]。目前,细菌、真菌、藻类等生物吸附剂吸附处理含铀废水的研究已有许多报道,而利用农林废弃物特别是稻秆吸附处理含铀废水的研究鲜见报道。

稻秆是一种农林废弃物,来源丰富,价格低廉。目前,全世界每年稻秆产量超过 17 亿吨,我国年产量达 7 亿吨左右,只有少量作为草食动物的饲料,绝大部分作为燃料或直接留在稻田作肥料被微生物分解,这就造成资源的严重浪费。稻秆中含有丰富的木质素、半纤维素、纤维素和蛋白质等,其细胞壁表面含有丰富的一OH、—COOH、Si=O、P=O等可与金属离子发生络合的官能团,具备较强的吸附能力^[9]。目前,刘澜^[9]研究表明稻秆经改性后对废水中亚甲基蓝去除效果较好,叶林顺等^[10]研究表明改性稻草吸附铜离子效果也较好。至今还尚未有 NaOH 改性稻秆应用于吸附铀的报道。本工作以稻秆为吸附剂、含 U(VI)溶液为吸附质,研究吸附剂改性方法、吸附剂用量、溶液 pH 值、吸附温度等因素对稻秆吸附 U(VI)效果的影响,探讨了改性稻秆吸附 U(VI)的热力学、动力学性质,旨在寻找一种高效经济的含铀放射性废水处理方法和为其今后的工程实践提供理论依据和技术支持。

1 实验材料与方法

1.1 仪器与试剂

721-A 型分光光度计,厦门分析仪器厂;SHA-CA 水浴恒温振荡器,金坛市科兴仪器厂;TD4 型高速离心机,湖南凯达实业发展有限公司;PHS-3C 型精密 pH 计,上海鹏顺科学仪器有限公司;FA1004N 型电子精密分析天平,精度 0.1 mg,上海民桥精密科学仪器有限公司。

NaOH、HCl、H₂O₂、NH₄·H₂O、丙酮、酚酞,分析纯,天津市大茂化学试剂厂;柠檬酸、缓冲溶液、混合掩蔽剂,分析纯,阿拉丁试剂有限公司。

改性稻秆的制备:将水稻茎(取自衡阳)切成约 5 cm 段,然后用自来水洗 3 次,用蒸馏水洗 1 次。将洗净的稻秆置于干燥箱 80 °C 下烘干 24 h,然后将其研磨,过 60 目标准筛,得到粒径 250 μm 稻秆样品。将样品置于干燥箱中备用。

吸附水样由铀标准溶液^[11]配制而成。

1.2 实验方法

用移液管取一定浓度的铀溶液 50 mL 放入 250 mL 的锥形瓶中,调节溶液 pH 值,向其加入一定量的稻秆,置于水浴恒温振荡器中反应一定时间,静置 10 min 后,移取液体于离心管中,以 2 000~3 000 r/min 离心分离 10 min 后,取 10 mL 上层清液用分光光度法测定溶液中铀溶液的浓度,并计算稻秆的吸附容量。改性稻秆对溶液中铀离子的去除率 $R(\%)$ 以及吸附量 Q (mg/g) 计算公式如下:

$$R = \frac{\rho_0 - \rho_e}{\rho_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$Q = \frac{(\rho_0 - \rho_e)V}{m} \quad (2)$$

式中, ρ_0 和 ρ_e 分别为初始和吸附平衡后溶液的离子质量浓度,mg/L; V 为溶液体积,L; m 为吸附剂的质量,g; Q 为平衡时稻秆对金属离子的吸附容量,mg/g; R 为稻秆对金属离子的去除率,%。

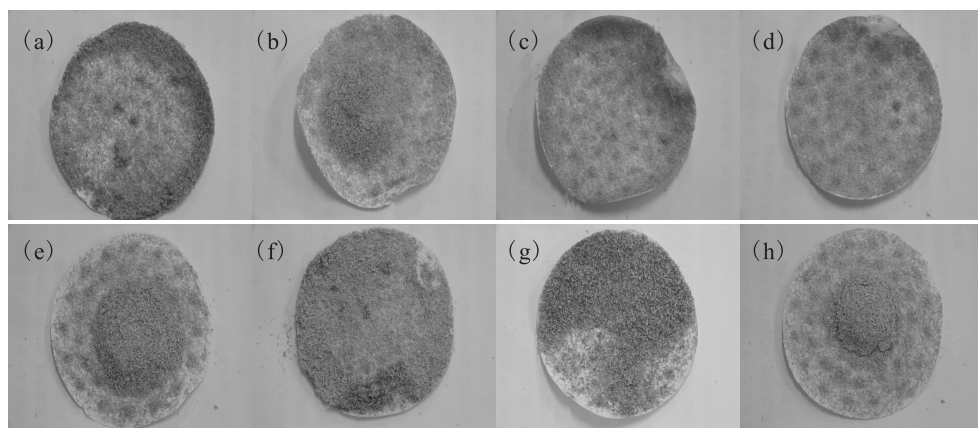
2 结果与讨论

2.1 改性剂对稻秆吸附 U(VI)的影响

分别在 50 mL 的 HCl、NaOH、H₂O₂、NH₄·H₂O 和柠檬酸中加入 4 g 的水稻茎,置于振荡

器上振荡 24 h。然后过滤,并用蒸馏水洗净,直至滤液 pH 值接近中性。然后将改性的水稻茎在干燥箱中 80 °C 下干燥 24 h,改性后的稻秆色泽变化示于图 1。分别投加不同改性剂改性

后的稻秆 0.2 g 于 pH=5.0、质量浓度为 10 mg/L 的铀溶液中,吸附 120 min,探讨改性剂对稻秆吸附铀的影响。改性剂对吸附效果的影响列入表 1。



c(NaOH), mol/L: (a) — 0.25, (b) — 0.5, (c) — 1.0, (d) — 1.5;
(e) — HCl, (f) — H₂O₂, (g) — NH₄ · H₂O, (h) — 柠檬酸 (Citric acid)

图 1 稻秆改性后的色泽变化

Fig. 1 Hues changes of rice stem before and after modified by modified materials

表 1 改性剂对稻秆吸附 U(VI)的影响

Table 1 Effect of modified materials on adsorption of U(VI) by rice stem

改性剂 (Modified materials)	R/%	Q/(mg · g ⁻¹)
-	76.11	1.52
0.25 mol/L NaOH	92.00	1.84
0.5 mol/L NaOH	94.55	1.89
1.0 mol/L NaOH	93.84	1.88
1.5 mol/L NaOH	87.68	1.75
HCl	89.46	1.79
H ₂ O ₂	92.74	1.85
NH ₄ · H ₂ O	91.98	1.84
柠檬酸 (Citric acid)	79.09	1.58

从图 1 可知,稻秆经不同改性剂改性后,色泽和质地都发生不同地变化。经 NaOH 改性的稻秆色泽较其它改性剂改性的稻秆色泽要微浅,且质地相对纤细、柔软。从表 1 可知改性的稻秆对 U(VI)的吸附效果有明显提高。而经 NaOH、HCl、H₂O₂、NH₄ · H₂O 和柠檬酸改性的稻秆与未改性稻秆相比较,经 NaOH 改性的稻秆吸附效果要好,其中以 0.5 mol/L NaOH 改性剂改性效果

最好,去除率达到 94.55%,吸附量达到 1.89 mg/g。这是由于稻秆经 NaOH 改性后,稻秆中半纤维素、纤维素与木质素之间交联网状结构被打破,木质素和半纤维素被溶解出来,增加了水稻的吸附比表面积^[9,12];稻秆中的表面的 SiO₂ 和脂类物质与 NaOH 反应,增加了稻秆的吸附活性位点^[11]。因此,0.5 mol/L NaOH 能够较好地改性稻秆,且以下改性稻秆均为经 0.5 mol/L NaOH 改性处理后的稻秆。

2.2 初始 pH 对改性稻秆吸附 U(VI)的影响

分别在溶液初始 pH=1.4~7.0、质量浓度为 10 mg/L 的 40 mL 铀溶液的锥形瓶中加入 0.2 g 改性稻秆,探讨初始 pH 对改性稻秆吸附 U(VI)的影响。溶液初始 pH 值对吸附 U(VI)的效果影响示于图 2。从图 2 结果可知,改性稻秆对 U(VI)的吸附随着溶液中 H⁺ 浓度变化而变化。随着溶液 pH 值的增加,去除率先增加后降低。在 pH=4.0 时达到最大值 97.56%,当 pH>4.0 后去除率降低。这是由于溶液的 pH 不仅影响铀离子的存在形式,也影响水稻细胞的表面活性吸附位点^[13]。在 pH<4.0 时,H⁺ (或 H₃O⁺) 与 UO₂²⁺ 在稻秆表面的活性位点上竞争吸附,H⁺ 抑制了 UO₂²⁺ 被活性位点吸附,所以随 pH 增加到 4.0,吸附率升

高;当 pH 较大时, UO_2^{2+} 与 OH^- 反应, 铀离子水解为 UO_2^{2+} 、 $[\text{UO}_2(\text{OH})]^+$ 、 $[(\text{UO}_2)_2(\text{OH})_2]^{2+}$ 、 $[(\text{UO}_2)_3(\text{OH})_5]^{+[\text{14}]}$, 铀离子浓度降低, 故去除率降低。所以, 溶液最佳初始 pH=4.0。

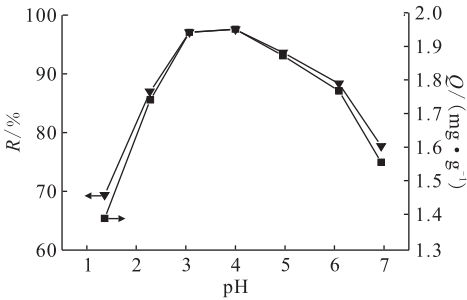


图 2 初始 pH 对吸附 U(VI) 的影响

Fig. 2 Effect of initial pH on adsorption of U(VI)

2.3 吸附时间对改性稻秆吸附 U(VI) 的影响

在铀溶液(初始溶液 pH=4.0, 质量浓度为 10 mg/L, 体积为 40 mL)中加入改性稻秆 0.2 g, 分别反应 20~255 min, 探讨吸附时间对改性稻秆吸附 U(VI) 的影响。吸附时间对吸附效果影响示于图 3。从图 3 结果可知, 随着吸附时间增加, 改性稻秆对 U(VI) 的去除率和吸附量都逐渐增加, 在前 180 min 内增加很快, 180 min 以后趋于平缓, 吸附逐渐达到平衡, 改性稻秆对 U(VI) 去除率达到 94.51%, 这说明在 180~255 min, 反应达到平衡。这是由于吸附开始时, 反应主要在表面的活性位点, 随着反应时间增加, 活性位点减少, 从而吸附减慢到逐渐平衡。所以, 最佳反应时间为 180 min。

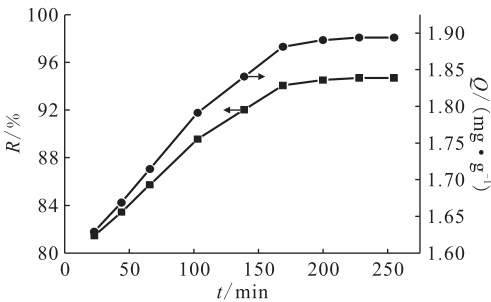


图 3 吸附时间对吸附 U(VI) 的影响

Fig. 3 Effect of time on adsorption of U(VI)

2.4 铀初始质量浓度对改性稻秆吸附 U(VI) 的影响

分别移取初始质量浓度为 5、10、20、30、40、

50、60 mg/L 的铀溶液(初始溶液 pH=4.0, 体积为 40 mL)于锥形瓶中, 反应 180 min, 探讨铀初始质量浓度对改性稻秆吸附 U(VI) 的影响。铀初始质量浓度对吸附效果影响示于图 4。从图 4 结果可知, 随着溶液初始浓度的提高, UO_2^{2+} 的去除率降低, 吸附量升高, 在铀初始质量浓度为 60 mg/L 时, U(VI) 的去除率为 94.50%, 吸附量为 11.34 mg/g。这是由于在初始质量浓度较低时, UO_2^{2+} 能与改性稻秆的活性位点充分接触, 所以大部分 UO_2^{2+} 能够被活性位点吸收, 因而去除率较高。随着铀初始质量浓度升高, 溶液中 UO_2^{2+} 数量增多, 改性稻秆表面的活性位点吸附至饱和, 增加的 UO_2^{2+} 游离在溶液中, 故去除率降低, 吸附量升高。

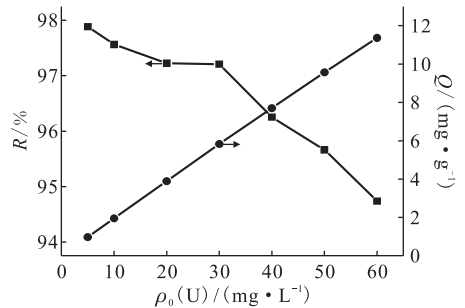


图 4 铀初始质量浓度对吸附 U(VI) 的影响

Fig. 4 Effect of uranium initial mass concentration on adsorption of U(VI)

2.5 改性稻秆投加量对改性稻秆吸附 U(VI) 的影响

分别投加 1.25、2.50、3.75、5.00、6.25、7.50、8.75 mg/L 改性稻秆于铀溶液(初始溶液 pH=4.0, 体积为 40 mL, 质量浓度为 10 mg/L)中反应 180 min, 进行吸附实验, 探讨改性稻秆投加量对改性稻秆吸附 U(VI) 的影响。改性稻秆投加量(ρ)对吸附效果影响示于图 5。从图 5 可以看出, 随着改性稻秆投加量的增加, UO_2^{2+} 的去除率逐渐增大, 当改性稻秆投加量增加到 6.25 g/L 时, 去除率趋于稳定, 吸附量却逐渐减少。当改性稻秆投加量从 1.25 g/L 增加到 8.75 g/L 时, 有机改性稻秆对 U(VI) 的去除率分别从 80% 增加到 97%, 吸附量从 6.3 mg/g 减少到 1.1 mg/g。这是由于当改性稻秆用量进一步增加时, 可能由于溶液中 UO_2^{2+} 能够与改性稻秆表面活性位点充分接触, 溶液中铀离子几乎都被活性位点结合, 而增加的部分吸附剂表面活性位点没有溶液中

UO₂²⁺ 与其结合,从而去除率趋于稳定,而吸附量降低^[10]。所以最佳吸附剂投加量为 5~8 g/L。

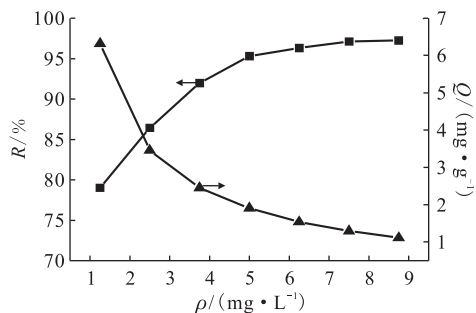


图 5 吸附剂投加量对吸附 U(VI)的影响
Fig. 5 Effect of adsorbent dose on adsorption of U(VI)

2.6 温度对改性稻秆吸附 U(VI)的影响

分别在温度为 298.15、303.15、308.15、313.15、318.15 K 下,将改性稻秆 0.2 g 加入到铀溶液(初始溶液 pH=4.0, 体积为 40 mL, 质量浓度为 10 mg/L)中反应 180 min,进行吸附实验,探讨温度对改性稻秆吸附 U(VI)的影响。温度对吸附效果影响示于图 6。从图 6 可以看出,随着温度的升高,改性稻秆对 UO₂²⁺ 的去除率有较少的增长,这表明温度对吸附反应有影响,升高温度有助于改性稻秆吸附铀离子。可能升温产生新的吸附位点,或部分 UO₂²⁺ 活化并能克服能垒且扩散加速,从而增加了吸附效果。考虑实际实验条件和成本,故吸附实验在室温条件下进行。

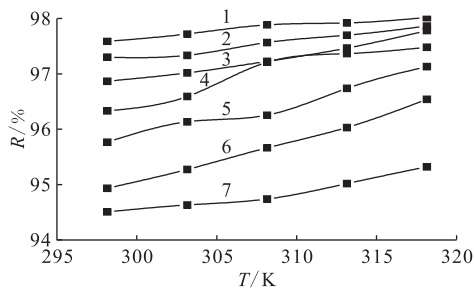
2.7 改性稻秆吸附 U(VI)的热力学分析

在吸附平衡研究中,常用 Langmuir 和 Freundlich 公式描述等温吸附过程。Langmuir 等温式假定吸附剂对溶质的吸附为单层吸附,而且由于吸附剂比表面积的限制,其吸附量存在一个最

大值称为吸附容量,其线性表达式为式(3):

$$\rho_e/q_e = \rho_e/q_m + 1/bq_m \quad (3)$$

式中: q_e 为单位质量吸附剂所吸附的吸附质的质量,mg/g; ρ_e 为吸附平衡时的吸附质质量浓度,mg/L; q_m 为吸附剂单层最大吸附量,mg/g; b 为常数。



ρ(U),mg/L:1—5,2—10,3—20,4—30,5—40,6—50,7—60

图 6 温度对吸附 U(VI)的影响
Fig. 6 Effect of temperature on adsorption of U(VI)

Freundlich 吸附等温线,其线性表达式为式(4):

$$\lg q_e = (1/n)\lg \rho_e + \lg K_f \quad (4)$$

式中: q_e 为单位质量吸附剂所吸附的吸附质的质量,mg/g; ρ_e 为吸附平衡时的吸附质质量浓度,mg/L; K_f 为吸附系数, n 为常数。其中 n 值影响吸附性能, n 值越大,即 $1/n$ 值越小,吸附性能越好,一般认为 $1/n=0.1\sim 0.5$ 时,吸附剂容易吸附吸附质; $1/n>2$ 时,则吸附剂难以吸附吸附质^[12]。

根据 Langmuir 公式和 Freundlich 公式对实验数据进行拟合,所得曲线示于图 7,等温吸附数据参数列于表 2。比较图 7 两个等温线方程并结合表 2 可知,由 Langmuir 方程相关系数 $r^2 = 0.9899$ 和 Freundlich 方程相关系数 $r^2 = 0.9844$ 可知,Langmuir 吸附曲线较 Freundlich 吸附曲线

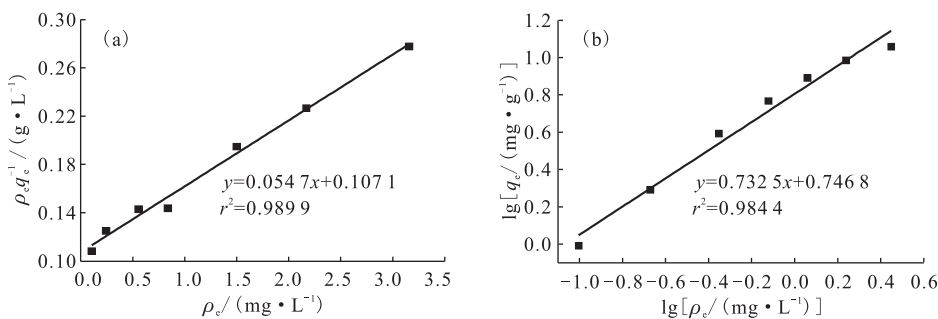


图 7 Langmuir(a)和 Freundlich(b)吸附等温线
Fig. 7 Langmuir(a) and Freundlich(b) adsorption isotherms

拟合得更好,用 Langmuir 方程描述改性稻秆吸附 U(VI) 优于 Freundlich 方程,即改性稻秆吸附过程单层吸附模式优于多层覆盖模式,以均匀吸附为主^[11],且改性稻秆较易吸附溶液中的 U(VI)。

表 2 改性稻秆的等温吸附参数

Table 2 Isotherm parameters for U(VI) adsorption on modified rice stem

Langmuir			Freundlich		
q_m	b	r^2	K_f	n	r^2
18.288 3	0.510 7	0.989 9	5.582 3	1.365 1	0.984 4

2.8 改性稻秆吸附 U(VI) 的动力学研究

吸附动力学研究是为了描述吸附剂吸附溶质速率的快慢,利用动力学吸附模型对数据拟合,探讨其吸附机理。实验数据采用准一级吸附速率、准二级吸附速率、Elovich 的经典吸附动力学^[15-20]方程模型对改性稻秆吸附铀进行拟合,方程的线性表达式如公式(5—7)。

准一级吸附速率方程:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t / 2.303 \quad (5)$$

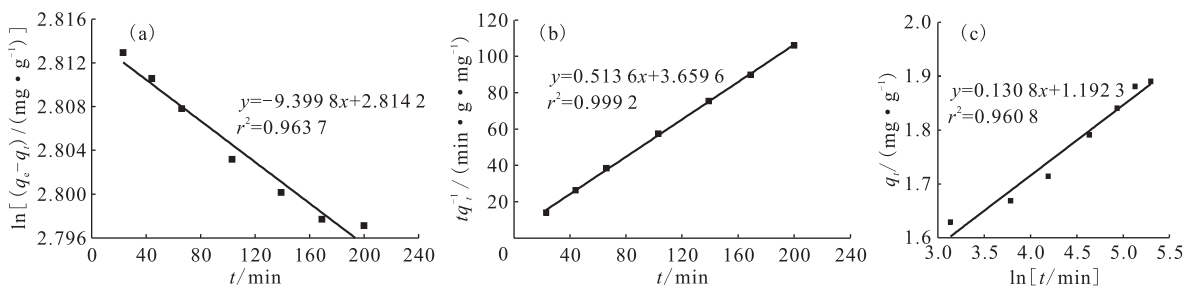


图 8 准一级(a)、准二级(b)和 Elovich(c)吸附速率方程

Fig. 8 Plot of Pseudo-first-order(a), Pseudo-second-order(b), and Elovich diffusion(c)

表 3 改性稻秆的吸附动力学参数

Table 3 Kinetic parameters of U(VI) adsorption on modified rice stem

准一级吸附速率模型 (Pseudo-first-order)			准二级吸附速率模型 (Pseudo-second-order)			Elovich 动力学模型 (Elovich diffusion)		
k_1	q_e	r^2	k_2	q_e	r^2	k_e	b	r^2
0.000 94	16.679 0	0.963 7	0.072 1	1.946 7	0.999 2	0.130 8	1.192 3	0.960 8

3 结论

(1) 通过对稻秆的改性,可以提高稻秆对 U(VI) 的吸附能力,U(VI) 去除率有明显提高,最佳改性剂为 0.5 mol/L 的 NaOH 溶液。

准二级吸附速率方程:

$$t/q_t = 1/(k_2 q_e^2) + t/q_e \quad (6)$$

Elovich 模型方程:

$$q_t = a + k_e \ln t \quad (7)$$

式中: q_e 、 q_t 分别为吸附平衡和 t 时刻对轴的吸附量,mg/g; k_1 、 k_2 分别为准一级、准二级吸附速率常数, min^{-1} ; t 为吸附时间,min; k_e 、 a 为常数。根据准一级和准二级吸附速率模型、Elovich 吸附动力学方程模型对实验数据拟合,所得曲线示于图 8,吸附动力学参数列于表 3。

从图 8 等温线方程并结合表 3 可知,准二级吸附速率动力学模型较准一级吸附速率方程和 Elovich 模型更能够较好地描述改性稻秆对铀的吸附动力学过程,实验数据与拟合方程参数吻合得较好,其相关系数 r^2 达到 0.999 2,平衡吸附量 1.946 7 mg/g 与实验结果 1.890 3 mg/g 也比较接近。因此,改性稻秆对 U(VI) 的吸附动力学符合准二级吸附速率动力学模型,即改性稻秆吸附 U(VI) 的速率是建立在化学反应或通过电子共享、电子得失的化学吸附基础上。

(2) 改性稻秆吸附 U(VI) 溶液的优化条件为:溶液 pH=4.0,吸附时间为 180 min,改性稻秆投加量为 5~8 g/L,吸附温度为室温,且改性稻秆对铀的吸附量与铀的初始质量浓度成正比。

(3) 改性稻秆对铀的吸附符合 Freundlich 等

温吸附特性,相关系数 r^2 达到 0.989 9,以单层均匀吸附模式为主。改性稻秆的吸附动力学行为可用准二级吸附速率吸附动力学模型拟合,测量值和计算值吻合较好,相关系数 r^2 达到 0.999 2。

参考文献:

- [1] 池翠萍,王仲文. 贫铀武器对人体健康的影响[J]. 中华放射医学与防护杂志,2002,22(2):137-139.
- [2] 王建龙,陈灿. 微生物还原放射性核素研究进展[J]. 核技术,2006,29(4):286-290.
- [3] 蔡璇,刘燕,张云,等. 核事故产生的放射性废水处理方法研究进展[J]. 化学通报,2012,75(6):483-488.
- [4] 杨庆,侯立安,王佑君. 中低水平放射性废水处理技术研究进展[J]. 环境科学与管理,2007,32(9):103-107.
- [5] Padmavathy V, Vasudevan P, Dhingra S C. Biosorption of nickel(II) ions on Baker's yeast[J]. Process Biochem, 2003, 38(10): 1389-1395.
- [6] 马前,张小龙. 国内外重金属废水处理新技术的研究进展[J]. 环境工程学报,2007,1(7):10-14.
- [7] 杨腊梅,俞杰,张勇. 放射性废水处理技术研究进展[J]. 能源环境保护,2007,20(4):35-37.
- [8] 夏良树,谭凯旋,王晓,等. 铀在榕树叶上的吸附行为及其机理分析[J]. 原子能科学技术,2010,44(3):279-284.
- [9] 刘澜. 改性稻秆吸附剂表征及处理亚甲基蓝溶液的吸附性能研究[D]. 四川:重庆大学,2011.
- [10] 叶林顺,刘慧璇,谢咏梅,等. 改性稻草吸附铜离子的动力学机理[J]. 环境科学与技术,2006,8(29):28-30.
- [11] 王晓,夏良树,郑伟娜,等. 改性麦秸对 U(VI)的吸附性能及机理[J]. 过程工程学报,2010,10(6):1084-1090.
- [12] 张显权,韩景泉,周大勇,等. 麦秸预处理方式对麦秸—无机凝胶复合材的影响[J]. 东北林业大学学报,2010,38(2):45-57.
- [13] Esposito A, Pagnanelli F, Veglia F. pH-related equilibria models for biosorption in single metal system[J]. Chem Eng Sci, 2002, 57: 307-310.
- [14] Harshala P, Shreeram J, Niyoti S, et al. Uranium removal from aqueous solution by coir pith: equilibrium and kinetic studies [J]. Bioresour Technol, 2005, 96: 1241-1248.
- [15] Xia L S, Tan K X, Wang X, et al. Uranium removal from aqueous solution by banyan leaves: equilibrium, thermodynamic, kinetic, and mechanism studies[J]. J Environ Eng, 2013, 139: 887-895.
- [16] 余筱洁,周存山,王允祥,等. 山核桃活性炭制备及其吸附苯胺特性[J]. 过程工程学报,2010,10(1):65-69.
- [17] 郑伟娜. 谷壳吸附含铀废水的行为及机理研究[D]. 衡阳:南华大学,2011.
- [18] Placha D, Martynkova G S, Rummeli M H. Preparation of organovermiculites using HDTMA: structure and sorptive properties using naphthalene[J]. J Colloid Interface Sci, 2008, 327(2): 341-347.
- [19] Liao C J, Chen C P, Wang M K, et al. Sorption of chlorophenoxy propionic acids by organoclay complexes[J]. Environ Toxicol, 2006, 21(1): 71-79.
- [20] Anirudhan T S, Suchithra P S, Rijith S. Amine-modified polyacrylamide-bentonite composite for the adsorption of humic acid in aqueous solutions[J]. Colloids Surf, A, 2008, 326 (3): 147-156.