

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2021.02.001

柚皮基活性炭的微波制备及其对 U(VI) 的吸附

吕翔^{1,2}, 程之宽^{1,2}, 李照鹏³, 袁杨兴^{1,2}, 谢志鹏^{1,2},
林水泉⁴, 廖军⁵, 喻清^{1,2*}

(1. 南华大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 南华大学 铀矿冶生物技术国防重点学科实验室, 湖南 衡阳 421001; 3. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083; 4. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 5. 中核江西矿冶科技集团有限公司, 江西 南昌 330019)

摘要:为探究 U(VI) 溶液初始浓度、溶液 pH、活性炭投加量、吸附时间对 U(VI) 去除效果的影响, 以农业废弃物柚子皮为原料、氯化锌为活化剂、微波为热源, 制备了柚皮基活性炭, 将制得的最优活性炭进行 U(VI) 吸附实验, 并分析了其吸附动力学方程, 探讨了其吸附 U(VI) 的机理。实验结果表明: 在活化浓度为 30%、活化剂浸渍时间为 24 h、微波功率为 700 W、辐照时间为 90 s 的条件下, 柚皮基活性炭对碘的吸附值最高, 达到 769.9 mg/g; 在 U(VI) 溶液初始质量浓度为 5 mg/L、溶液 pH 为 7、活性炭投加量为 0.6 g/L、吸附时间为 24 h 时可以达到吸附平衡, U(VI) 的饱和吸附容量为 8.25 mg/g, 吸附率为 99.01%; 其吸附 U(VI) 的行为符合准二级动力学模型, 吸附 U(VI) 前后自身结构发生较大变化, 柚皮基活性炭对 U(VI) 的吸附是一种以化学吸附为主、活性炭表面的羰基、C=N、C=C、羟基和羧酸等官能团与 U(VI) 水解后的离子作用并存的吸附方式。

关键词:柚皮基活性炭; 微波; 铀; 废水处理

中图分类号:X771 **文献标志码:**A

文章编号:1673-0062(2021)02-0001-08

The Preparation of Activated Carbon from Pomelo Peel by Microwave Radiation and its Adsorption of Uranium

LÜ Xiang^{1,2}, CHENG Zhikuan^{1,2}, LI Zhaopeng³, YUAN Yangxing^{1,2},

收稿日期: 2020-11-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51804164; 51774187); 湖南省教育厅资助项目(18B276; 18B266; 18A247; 17A184); 湖南省大学生研究性学习和创新性实验计划项目(20202799); 金属矿山安全与健康国家重点实验室项目(zdsys2018-007); 湖南省自然科学基金资助项目(2017JJ3274); 湖南省高新技术产业科技创新引领计划(科技攻关类)项目(2020SK2024); 湖南省教育厅优秀青年项目(18B266); 南华大学大学生研究性学习和创新性实验计划项目(201412; 201422; 201501)

作者简介:吕翔(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事铀矿冶放射性污染修复等方面的研究。E-mail: 252152846@qq.com。* 通信作者: 喻清(1984—), 男, 讲师, 博士, 主要从事铀矿冶放射性污染修复等方面的研究。E-mail: ckyuqingk@126.com

XIE Zhipeng^{1,2}, LIN Shuiquan⁴, LIAO Jun⁵, YU Qing^{1,2*}

(1. School of Resource Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 2. Key Discipline Laboratory of Defense Biotechnology in Uranium Mining and Hydrometallurgy, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 3. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China; 4. School of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093; 5. Mining and Metallurgy Technology Group Co. LTD of Jiangxi of CNNC, Nanchang, Jiangxi 330019, China)

Abstract: In order to explore the effect of initial concentration of U(VI) solution, pH of solution, dosage of activated carbon, adsorption time on the removal effect of U(VI), the activated carbon which taking pomelo skin from agricultural waste as raw material was prepared by using Zinc chloride as activator before microwave pretreatment, the optimal activated carbon was used for U(VI) adsorption experiment, and its adsorption kinetic equation was analyzed, and the adsorption mechanism of U(VI) on naringin activated carbon was studied by SEM, EDS and FTIR. The experimental results show that the adsorption value of iodine on naringin activated carbon reach the highest when the activator concentration was 30%, immersion time was 24 h, and the power of microwave was 700 W which irradiated 90 seconds. The adsorption value will reach 769.9 mg/g. The adsorption equilibrium can be reached when the initial concentration of U(VI) solution is 5 mg/L, the pH of the solution is 7, the dosage of activated carbon is 0.6 g/L, and the adsorption time is 24 h. At this point, the adsorption capacity of U(VI) was 8.25 mg/g, and the adsorption rate was 99.01%. The adsorption behavior of U(VI) is more in line with the quasi-second-order kinetic model. The structure of adsorption U(VI) changed greatly after adsorption. The adsorption of U(VI) is a kind of chemical adsorption which the carbonyl, C=N, C=C, hydroxyl groups and carboxylic acid functional groups on the surface of activated carbon have effect on hydrolysate of U(VI).

key words: activated carbon of pomelo peel; microwave; U(VI); wastewater treatment

0 引言

铀是我国发展核工业的基础原料,随着我国对铀资源的需求量增大,在核工业生产中不可避免会产生大量的含铀废水^[1-2]。我国铀矿山和水冶厂所产生的含铀废水,其铀含量约为 5 mg/L,是世界卫生组织所规定排放标准含铀量 50 μ g/L 的一百倍之多,更是河流、海水中铀含量的一千多倍^[3]。这些铀元素如果排放到自然环境中,势必对生态环境造成巨大危害。

对处理含铀废水而言,吸附法具有适应铀浓度低的废水、受其他元素离子干扰小、操作简单、成本低、安全可靠且吸附率高等特点,在废水处理领域运用广泛。它是利用吸附剂的多孔结构和高比表面积等特性,将放射性核素和其他重金属元

素吸附在吸附剂的表面和其孔隙中,达到处理废水的目的。同时,吸附剂表面还有各种丰富的化学活性基团,对所吸附的目标核素有更好的选择性,进一步提高了吸附效果。常用的吸附剂分为炭材料吸附剂、矿物材料吸附剂、高分子材料吸附剂和生物质吸附剂等^[4-7]。

传统吸附剂制备过程繁杂、制备成本昂贵;有些吸附剂的吸附容量低、耐酸性差,甚至造成严重的环境污染,这些缺点极大的限制了其应用^[8-10]。活性炭因其特有的高比表面积、性质稳定、吸附能力强且制备原料多样等特点,渐渐广泛用于铀废水处理,作为铀废水处理的常用吸附剂。

近年来,国内外对各种价格低廉、来源广泛的农林废弃物制备活性炭进行了研究^[11-18]。柚子皮是一种常见的农业废弃物,无毒性,易被生物降

解,为将其废物利用,本文通过对柚子皮进行微波辐照,提出一种新型柚子皮活性炭吸附剂的制备方法,并对其吸附铀的机理进行阐释,以揭示柚皮基活性炭有效吸附含铀废水的机理,为高效、廉价处理含铀废水的探究提供理论依据。实现了“以废治废”的环保理念。

1 实验

1.1 材料、试剂和仪器

柚子皮:来自广东梅州的新鲜沙田柚,去除其黄色外皮,留下白色内皮和柚子囊。氯化锌、盐酸、碘、碘化钾、硫代硫酸钠、可溶性淀粉、无水碳酸钙、碘酸钾、氢氧化钠、酚酞、氨水、硝酸、丙酮、无水乙醇:分析纯;八氧化三铀:基准试剂。

用八氧化三铀配制质量浓度为1 g/L的U(VI)标准溶液,将该溶液稀释后进行实验。

PHSJ-3T型微波炉:美的微波炉制造有限公司;AL-104型电子天平:梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;PHSJ-3T型pH计:上海仪电科学仪器股份有限公司;BDG-9106A型干燥箱:上海一恒科学仪器有限公司;DJS-2012R型摇床:上海世平实验设备有限公司;T6新世纪型紫外光可见分光光度计:北京普析通用仪器有限责任公司;Spectrum One型傅里叶红外光谱仪:美国珀金埃尔默公司;S-4700型扫描电镜:日本日立公司。

1.2 实验方法

1.2.1 柚皮基活性炭的制备

将手工处理后的柚子皮于100℃的干燥箱中干燥24 h,并破碎至10 mm的颗粒;称取10 g柚子皮和100 mL相应浓度的氯化锌活化剂混合放入广口锥形瓶中活化浸渍一定时间;浸渍好的柚子皮在110℃下干燥2 h,去除多余水分后放入微波炉中进行微波辐照;辐照结束后用体积比为1:1盐酸溶液加热条件下酸洗1 h;然后用双蒸水洗至洗涤液澄清;再将酸洗、水洗后的样品在85℃下干燥12 h至恒重,于干燥器中冷却后研磨,过74 μm筛后即可制得成品柚皮基活性炭。

1.2.2 柚皮基活性炭碘吸附值测定

根据我国活性炭碘吸附值的测定规范(GB/T 12496.8—2015),将干燥后过74 μm筛的成品柚皮基活性炭取出,准确称取0.50 g,移入250 mL的磨口锥形瓶中,加入10 mL质量浓度为5%的盐酸,充分混合后在万用电炉上煮沸30 s,冷却后

加入50 mL浓度为0.1 mol/L的碘标溶液,盖上瓶盖后,放入摇床振荡,15 min后取出并过滤。

在锥形瓶中,分别用移液管准确移取10 mL滤液,100 mL双蒸水;用0.1 mol/L的硫代硫酸钠标准液滴定,滴定期间,当溶液颜色变淡后,需滴加2 mL的淀粉指示剂,直至滴定到变为无色溶液。碘吸附值*A*的计算公式见式(1)、(2)、(3)。

$$A = (X/M)D \quad (1)$$

$$X/D = [5(10c_1 - 1.2c_2V_2) \times 126.93]/m \quad (2)$$

$$c = c_2V_2/10 \quad (3)$$

式中:*A*为柚皮基活性炭的碘吸附值,mg/g;*X/M*为单位柚皮基活性炭的碘量吸附值,mg/g;*D*为校正因子;*c*₁为碘标的浓度,mol/L;*c*₂为硫代硫酸钠标的浓度,mol/L;*V*₂为硫代硫酸钠标准液滴定消耗量,mL;*m*为柚皮基活性炭投加量,g;*c*为剩余滤液浓度,mol/L;126.93为碘的单位摩尔质量,g/mol。

1.2.3 静态吸附试验

在200 r/min和25℃条件下向装有50 mL铀标准溶液的250 mL的锥形瓶中,加入一定量干燥的柚皮基活性炭进行铀吸附试验。采用0.1~1 mol/L的盐酸和氢氧化钠调节溶液的初始pH值。对每个吸附试验,设平行样3个,同时设空白对照样1个。再将其置于摇床中,在设定的试验条件下振荡,振荡结束后过滤,取滤液的上清液分析其铀浓度。对每个吸附试验,用统计学方法对所有结果进行差异显著性校验。吸附剂对铀的去除率及吸附量采用式(4)、式(5)计算:

$$R = (\rho_0 - \rho_e)/\rho_0 \times 100\% \quad (4)$$

$$Q_t = (\rho_0 - \rho_t)V/m \quad (5)$$

式中:*R*为吸附剂对铀的吸附率;*ρ*₀为初始铀质量浓度,mg/L;*ρ*_e为吸附平衡时的铀质量浓度,mg/L;*ρ*_t为*t*时刻的剩余铀质量浓度,mg/L;*Q*_t为*t*时刻的吸附量,mg/g;*V*为铀溶液的体积,L;*m*为吸附剂的投加量,g。

1.2.4 分析方法

采用紫外光分光光度计测定吸附后溶液中剩余U(VI)浓度,并选用吸附容量(*Q*_t)和吸附率(*R*)两个指标来评价柚皮基活性炭对U(VI)的吸附性能。

采用扫描电镜及能谱仪来表征柚皮基活性炭吸附铀前后的表面形貌及元素组成;采用傅里叶红外光谱来表征吸附铀前后活性炭表面官能团的变化。

2 结果与讨论

经柚皮基活性炭对碘吸附值的测定试验,得到最佳制备条件为:活化剂浓度为 30%、活化剂浸渍时间为 24 h、微波功率为 700 W、辐照时间为 90 s,此时,碘的吸附值最高,达到 769.9 mg/g,用于 U(VI) 的静态吸附试验。

2.1 初始 pH 对柚皮基活性炭吸附 U(VI) 的影响

控制初始 pH 分别为 2、3、4、5、6、7、8、9、10,在柚皮基活性炭投加量为 1 g/L、U(VI) 标初始质量浓度为 5 mg/L、摇床转速为 200 r/min、温度为 25 ℃、吸附 6 h 的条件下,柚皮基活性炭对 U(VI) 的吸附率和吸附量如图 1 所示。

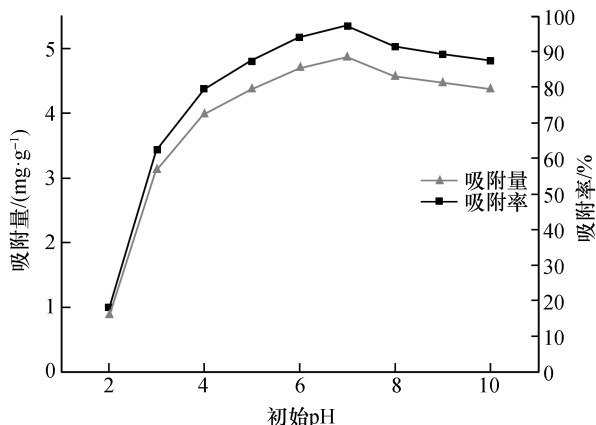


图 1 pH 对柚皮基活性炭吸附 U(VI) 效果的影响
Fig.1 Effect of pH on uranium (VI) adsorption by pomelo peel-based activated carbon

由图 1 可知,在初始 pH 为 2 时,柚皮基活性炭对 U(VI) 吸附率为 17.9%,吸附量为 0.89 mg/g;在过酸的情况下对于 U(VI) 的吸附能力受到了抑制。当初始 pH 为 7 时,吸附率和吸附量都达到了最高值,分别为 97.3% 和 4.87 mg/g。pH 达到 10 时,吸附率下降到 87.5%。这说明柚皮基活性炭的最优吸附 pH 为 7,在过酸或过碱的情况下,都会抑制活性炭对 U(VI) 的吸附效果。

2.2 柚皮基活性炭投加量对 U(VI) 吸附的影响

控制柚皮基活性炭的投加量分别为 0.02 g/L、0.1 g/L、0.2 g/L、0.6 g/L、1 g/L、2 g/L,在 U(VI) 标初始质量浓度为 5 mg/L、摇床转速为 200 r/min、温度为 25 ℃、初始 pH 为 7、吸附 6 h 的条件下,柚皮基活性炭对 U(VI) 的吸附率和吸附量如图 2 所示。

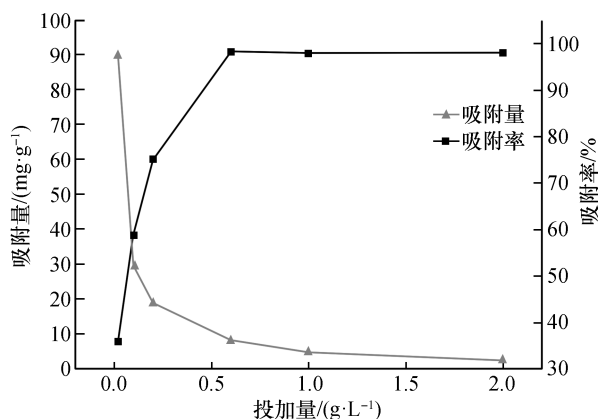


图 2 柚皮基活性炭投加量对吸附 U(VI) 效果的影响
Fig.2 Effect of the amount of naringin-based activated carbon on the adsorption of uranium (VI)

由图 2 可知,随着柚皮基活性炭的投加量的增大,柚皮基活性炭对 U(VI) 的吸附量不断减小,反之吸附率随之增大。结合柚皮基活性炭吸附初始 U(VI) 质量浓度为 5 mg/L 的 U(VI) 标后的溶液的 U(VI) 可知,虽然在投加量为 0.02 g/L 时,柚皮基活性炭对 U(VI) 的吸附量最高,达到了 89.87 mg/g,但其吸附率只有 36%,且剩余 U(VI) 质量浓度高达 3.20 mg/L;故在柚皮基活性炭投加量在投加量过低时,仅仅是因为投加量低而导致其吸附量高,并没有达到吸附处理废水中 U(VI) 的目的。反而在柚皮基活性炭的投加量为 0.6 g/L 时,活性炭对 U(VI) 质量浓度为 5 mg/L 的 U(VI) 标的吸附率达到了 98.4%,溶液吸附后的剩余 U(VI) 质量浓度为 80 μg/L,已经接近了规定的废水排放标准中的铀的允许排放浓度,吸附量为 8.2 mg/g,达到了处理废水中 U(VI) 的目的。在投加量大于 0.6 g/L 后,柚皮基活性炭对 U(VI) 的吸附能力几乎趋于稳定,处于饱和状态;故柚皮基活性炭在吸附低浓度含 U(VI) 溶液时,最佳投入量为 0.6 g/L。

2.3 初始 U(VI) 浓度对柚皮基活性炭吸附铀的影响

在柚皮基活性炭的投加量为 0.6 g/L、摇床转速 200 r/min、温度 25 ℃、初始 pH 为 7、吸附 6 h 的条件下,分别吸附初始 U(VI) 质量浓度为 1 mg/L、2 mg/L、3 mg/L、4 mg/L、5 mg/L 的 U(VI) 标,柚皮基活性炭对 U(VI) 的吸附率和吸附量如图 3 所示。

由图 3 可知,柚皮基活性炭对 U(VI) 的吸附值和吸附量随着 U(VI) 浓度增大而增大;且在 U(VI) 质量浓度为 1 mg/L 的较低浓度 U(VI) 的

环境中,柚皮基活性炭对 U(VI) 的吸附率也达到了 81.12%,说明了柚皮基活性炭对低浓度 U(VI) 的吸附能力,该活性炭可以适用于处理低浓度铀的核工业废水。且在我国铀矿山和水冶厂所产生的含铀废水的平均质量浓度 5 mg/L 的条件下,柚皮基活性炭对铀的吸附率和吸附量分别达到了 87.3% 和 8.11 mg/g。

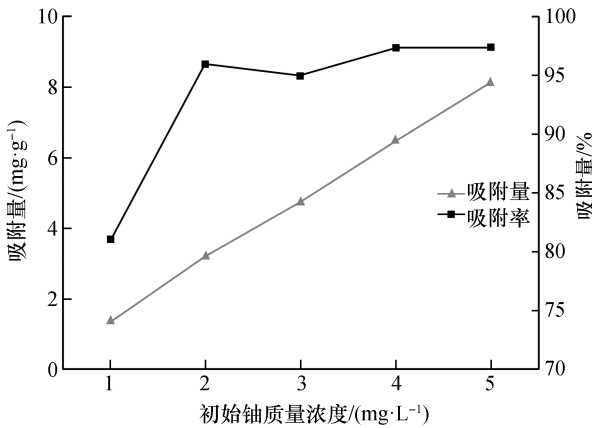


图 3 初始铀浓度对柚皮基活性炭吸附 U(VI) 效果的影响
Fig.3 Effect of initial uranium concentration on uranium (VI) adsorption by pomelo peel-based activated carbon

2.4 吸附时间对柚皮基活性炭吸附 U(VI) 的影响

在柚皮基活性炭的投加量为 0.6 g/L、U(VI) 初始质量浓度为 5 mg/L、摇床转速为 200 r/min、温度为 25 ℃、初始 pH 为 7 的条件下,分别吸附 1 h、2 h、3 h、4 h、5 h、6 h、12 h、24 h,柚皮基活性炭对 U(VI) 的吸附率和吸附量如图 4 所示。

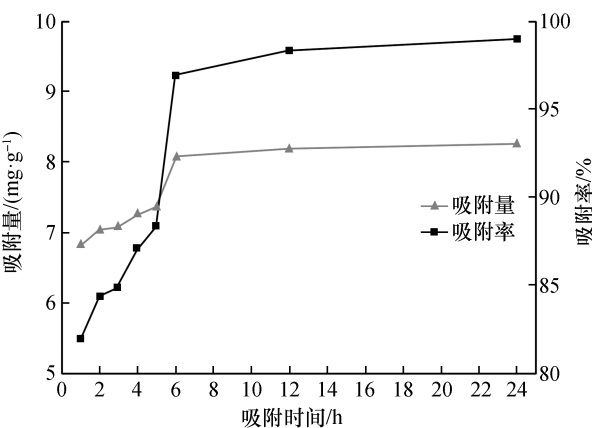


图 4 吸附时间对柚皮基活性炭吸附 U(VI) 效果的影响
Fig.4 Effect of adsorption time on uranium (VI) adsorption by pomelo peel-based activated carbon

由图 4 可知,随着吸附时间的延长,柚皮基活性炭吸附 U(VI) 的吸附率和吸附量逐渐增加;在吸附 1 h 时,柚皮基活性炭对初始质量浓度为 5 mg/L 的 U(VI) 标的吸附率便达到了 82%,吸附量达到 6.83 mg/g;说明柚皮基活性炭吸附 U(VI) 具有一定的高效性。从吸附 1 h 到 5 h,活性炭对 U(VI) 的吸附率增加了 6.35%,达到 88.35%,吸附量由 6.83 mg/g 增加到 7.36 mg/g,增长了 0.53 mg/g;而吸附时间由 5 h 延长到 6 h 时,吸附率和吸附量分别增长了 8.6% 和 0.72 mg/g。吸附时间超过 6 h 后,吸附效果开始趋于稳定,增长开始减缓;当吸附时间达到 24 h,柚皮基活性炭对 U(VI) 的吸附量和吸附率分别达到了 99.01% 和 8.25 mg/g,且吸附后剩余的 U(VI) 质量浓度达到了 49.62 μg/L,符合世界卫生组织所规定排放标准含铀量;故当吸附时间达到 24 h 时,柚皮基活性炭处理后的 5 mg/L 的 U(VI) 标达到了直接排放要求。

2.5 吸附动力学研究

在柚皮基活性炭的投加量为 0.6 g/L、U(VI) 初始质量浓度为 5 mg/L、摇床转速为 200 r/min、温度为 25 ℃、初始 pH 为 7 的条件下,探究柚皮基活性炭对铀吸附过程中的吸附动力学;准一级、二级动力学方程见式(6)、式(7)。

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t / q_t \quad (6)$$

$$t / q_t = 1 / (k_2 q_e^2) + t / q_e \quad (7)$$

式中: q_e 为柚皮基活性炭吸附铀的饱和吸附量,mg/g; q_t 为柚皮基活性炭在 t 时刻对铀的吸附量,mg/g; k_1 由 $\ln(q_e - q_t)$ 与 t 的拟合方程得出,为柚皮基活性炭吸附速率准一级常数; k_2 由 t / q_t 与 t 的拟合方程得出,为柚皮基活性炭吸附速率准二级常数。

柚皮基活性炭吸附 U(VI) 的关于 $\ln(q_e - q_t)$ 与 t 的拟合曲线如图 5 所示,柚皮基活性炭吸附 U(VI) 的关于 t / q_t 与 t 的拟合曲线如图 6 所示。拟合结果的相关参数见表 1。

表 1 吸附动力学方程参数					
Table 1 Parameters of the adsorption kinetic equation					
准一级动力学方程			准二级动力学方程		
$k_1 /$ (min^{-1})	$q_1 /$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	R_1^2	$k_2 /$ ($\text{min} \cdot \text{g} \cdot$ mg^{-1})	$q_e /$ ($\text{mg} \cdot$ g^{-1})	R_2^2
-0.005 29	8.25	0.852	0.118 14	8.25	0.997

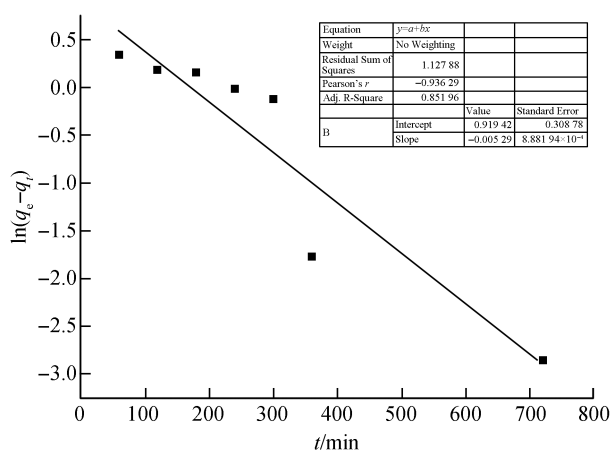


图5 柚皮基活性炭吸附铀的关于 $\ln(q_e - q_t)$ 与 t 的拟合曲线

Fig. 5 Fitting curves of $\ln(q_e - q_t)$ and t for uranium adsorption by naringin-based activated carbon

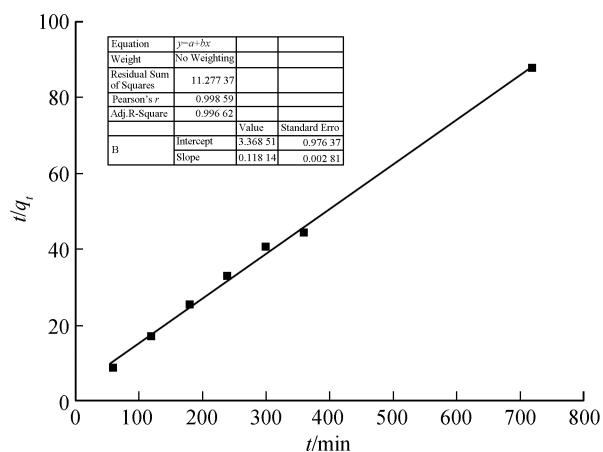


图6 柚皮基活性炭吸附铀的关于 t/q_t 与 t 的拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve of t/q_t and t for uranium adsorption by naringin-based activated carbon

柚皮基活性炭吸附 U(VI), 在投加量为 0.6 g/L、U(VI) 初始质量浓度为 5 mg/L、摇床转速为 200 r/min、温度为 25 ℃、初始 pH 为 7 的条件下, 由拟合结果可知与准一级动力学方程的 R_1^2 为 0.852, 与准二级动力学方程的 R_2^2 为 0.997; 拟合的相关性都比较强, 且准二级动力学相较准一级动力学更为合适, 准二级动力学更好的描述了柚皮基活性炭对 U(VI) 的吸附行为。这说明柚皮基活性炭上的活性位是取决于其对 U(VI) 吸附量的的决定性因素, 而吸附过程中所投入吸附剂的量与所吸附溶质的浓度是次要因素。

2.6 扫描电镜及能谱分析

柚皮基活性炭吸附 U(VI) 前后的扫描电镜

情况如图 7、图 8 所示。在吸附前, 柚皮基活性炭的表面非常粗糙, 松散多孔, 有大量的孔隙和凸起, 这表明柚皮基活性炭有较高的比表面积, 这为 U(VI) 的吸附创造了良好的条件。而吸附后的柚皮基活性炭的外观变得光滑平整, 微孔隙和凸起被填平, 柚皮基活性炭表面变得致密; 这说明吸附的 U(VI) 改变了柚皮基活性炭的外貌结构, 大量的铀被柚皮基活性炭吸附。

对吸附过 U(VI) 的柚皮基活性炭进行能谱分析, 结果表明活性炭在吸附后, 表面有 U(VI) 的存在, 经过点能谱测定, 局部区域 U(VI) 含量可高达 2.5%。

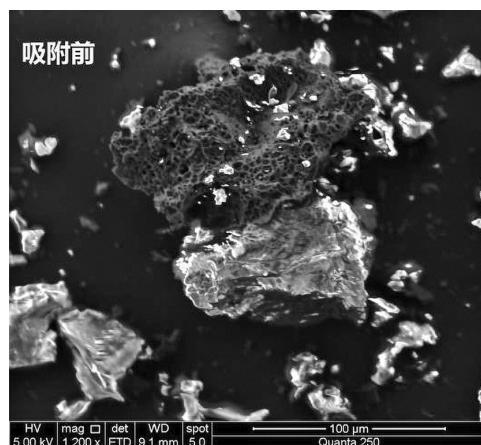


图7 吸附前的柚皮基活性炭 SEM 图像

Fig. 7 SEM image of pomelo peel-based activated carbon before adsorption

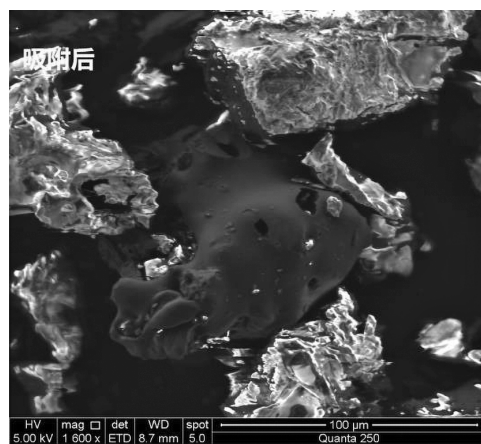


图8 吸附后的柚皮基活性炭 SEM 图像

Fig. 8 SEM image of naringin based activated carbon after adsorption

2.7 傅里叶红外光谱分析

柚皮基活性炭表面官能团变化情况如图 9 所示。由图可知, $1\ 707.00\ \text{cm}^{-1}$ 处出了一个宽峰,

这对应的是羰基中 $C=O$ 的伸缩振动吸收峰; $1\,612.49\text{ cm}^{-1}$ 处出现了一个尖峰,这是 $C=C$ 和 $C=N$ 的伸缩振动峰; $3\,570.24\text{ cm}^{-1}$ 的宽峰说明存在羟基和羧酸。吸附后,羰基、 $C=N$ 、 $C=C$ 、

羟基和羧酸等吸收峰都发生了一定的偏移,透过率也有所增大,说明这些官能团参与了对 U(VI) 的吸附。

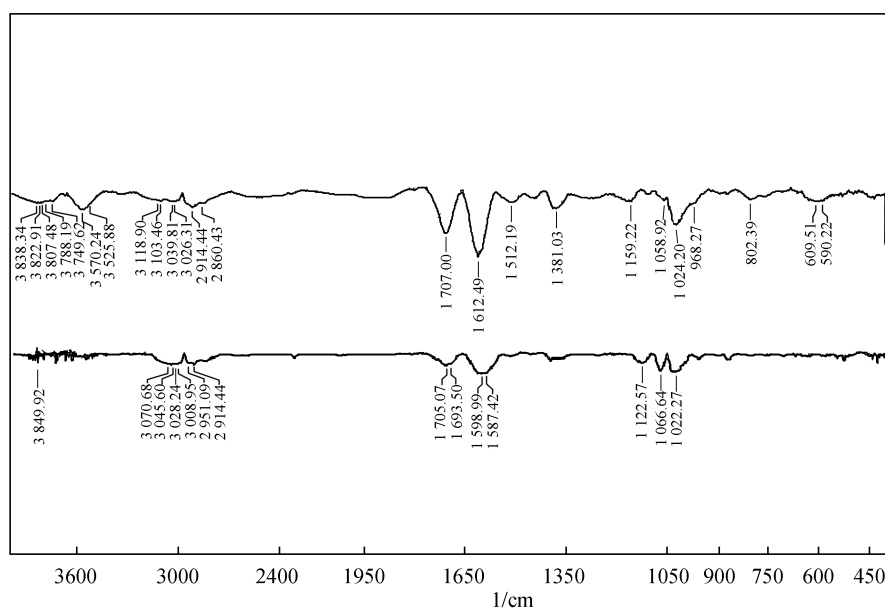


图9 吸附前后的柚皮基活性炭的红外光谱图

Fig.9 IR spectra of pomelo peel-based activated carbon before and after adsorption

3 结 论

1) 以农林废弃物柚子皮为原料、 $ZnCl_2$ 为活化剂、微波为热源,制备了柚皮基活性炭。在溶液中初始 U(VI) 质量浓度为 5 mg/L 、溶液 pH 为 7、活性炭投加量为 0.6 g/L 、吸附时间为 24 h 的较佳条件下,吸附率为 99.01%,吸附量为 8.25 mg/g ,且吸附后剩余的 U(VI) 质量浓度为 $49.62\text{ }\mu\text{g/L}$,符合规定排放标准。

2) 柚皮基活性炭吸附 U(VI) 的吸附动力学研究表明,与准一级动力学方程的相关关系 R_1^2 为 0.852,与准二级动力学方程的相关关系 R_2^2 为 0.997;柚皮基活性炭对 U(VI) 的吸附行为更符合准二级动力学方程,说明柚皮基活性炭上的活性位是取决于其对 U(VI) 吸附量的的决定性因素,而吸附过程中所投入吸附剂的量与所吸附溶质的浓度是次要因素。

3) 利用扫描电镜、能谱分析和红外光谱对柚皮基活性炭进行表征可知,吸附前后,柚皮基活性炭的外观发生巨大改变,且其表面的 U(VI) 含量可以达到 2.5%;羰基、 $C=N$ 、 $C=C$ 、羟基和羧酸

等各种官能团参与了吸附 U(VI) 的过程;说明物理吸附和化学吸附共同参与了柚皮基活性炭对 U(VI) 的吸附,也进一步证明了柚皮基活性炭吸附 U(VI) 过程与准二级动力学吻合,化学吸附是影响柚皮基活性炭的吸附能力重要因素。

参考文献:

- [1] 余文林,葛文胜,张伟,等. 全球铀资源勘查开发现状及对我国“走出去”战略的建议[J]. 资源与产业, 2015,17(3):45-50.
- [2] 任勃,范美青,王蕾. 含铀废水的处理方法研究进展[J]. 科技展望,2015,25(33):36.
- [3] WANG B E, HU Y Y, XIE L, et al. Biosorption behavior of azo dye by inactive CMC immobilized *Aspergillus fumigatus* beads[J]. Bioresource technology, 2008,99(4): 794-800.
- [4] 肖益群,夏良树,李瑞瑞,等. 改性稻秆吸附 U(VI) 的行为和机理研究[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(12):2130-2137.
- [5] 左天明,左魏铭,李金莲. 活性炭吸附法处理含铀放射性废水[J]. 四川地质学报,2015,35(3):473-475.
- [6] 隋利军. 碳材料在吸附铀方面的应用[J]. 轻工标准与质量,2016(2):62-63.

- [7] 陈朝猛,曾光明,汤池. 羟基磷灰石吸附处理含铀废水的研究[J]. 金属矿山,2009,395(5):135-137.
- [8] 魏广芝,徐乐昌. 低浓度含铀废水的处理技术及其研究进展[J]. 铀矿冶,2007,26(2):90-95.
- [9] 潘英杰,徐乐昌,薛建新,等. 国外铀矿冶设施的退役治理[J]. 铀矿冶,2012,31(2):92-95.
- [10] 李雅婕. 浅谈放射性废水处理技术[J]. 化工技术与开发,2011,40(10):62-64.
- [11] 崔纪成,杨瑛. 棉秆活性炭制备工艺及其碘吸附性能[J]. 江苏农业科学,2017,45(2):245-247.
- [12] 梁琪君,刘绍康,杨成相,等. 夏威夷果壳活性炭制备及双电层电容器性能研究[J]. 合成材料老化与应用,2017,46(1):14-17.
- [13] 沈月红,费良彩,李宗宝,等. 微波辅助稻壳活性炭制备条件初探[J]. 山东化工,2016,45(20):16-18.
- [14] 喻清,丁德馨,李登科,等. 固定化活性炭吸附铀(VI)试验[J]. 金属矿山,2016(2):172-175.
- [15] 李小燕,张明,刘义保,等. 花生壳活性炭吸附溶液中的铀[J]. 化工环保,2013,33(3):202-205.
- [16] PATHANIA D, SHARMA S, SINGH P. Removal of methylene blue by adsorption onto activated carbon developed from *Ficus carica* bast[J]. Arabian journal of chemistry,2017,10:S1445-S1451.
- [17] FUJISHIGE M, YOSHIDA I, TOYA Y, et al. Preparation of activated Carbon from bamboo-cellulose fiber and its use for EDLC electrode material[J]. Journal of environmental chemical engineering,2017,5(2):1801-1808.
- [18] LIU Y, WANG Y Z, ZHANG G X, et al. Preparation of activated Carbon from willow leaves and evaluation in electric double-layer capacitors[J]. Materials letters, 2016,176:60-63.
- [19] 韩承辉,谢伟芳,阮小燕,等. 柚子皮基活性炭对水溶液中 Cu(II) 的吸附及机制研究[J]. 有色金属(冶炼部分),2019(12):84-91.
- [20] 吴素强,刘永,何鹏. 椰壳活性炭对水溶液中铀(VI)的吸附研究[J]. 安徽农学通报,2019,25(7):126-129.
- [21] MARWA A, FAWWAZ I K, OLFA K. Manganese ferrite (MnFe_2O_4) as potential nanosorbent for adsorption of Uranium(VI) and Thorium(IV)[J]. Journal of radio-analytical chemistry,2020,323(1):515-537.
- [22] 赵玉婷,潘跃龙,刘羽,等. 粘土岩对铀(VI)的吸附性能[J]. 环境化学,2020,39(8):2279-2286.
- [23] 王扬,牛洁,徐乐昌. 大蒜渣生物质材料对铀的吸附性能研究[J]. 铀矿冶,2020,39(4):278-281.