

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2019.06.013

# 生物质废弃物柚子皮作为潜在吸附剂用于废水处理

王 琼, 黄丽媛, 古黄玲, 刘 珍

(湖南工业大学 城市与环境学院, 农牧业废弃物资源化综合利用湖南省重点实验室, 湖南 株洲 412007)

**摘 要:** 生物质废弃物柚子皮作为一种潜在、有效的低成本吸附剂, 被研究用于废水处理。首先, 介绍了柚子皮的物理化学性质, 分析了其天然具备优异吸附性能的原因; 然后, 重点介绍了柚子皮对含重金属废水、放射性废水、印染废水、有机废水、医药废水、含氟废水、含油污水等各类废水的处理现状, 探讨了对柚子皮吸附剂再生利用的可行性。结果表明, 柚子皮具有良好的可重复利用性和较高的稳定性, 有潜力成为一种技术可行、以废治废、环境友好型的吸附材料。

**关键词:** 吸附剂; 生物质废弃物; 柚子皮; 废水处理

**中图分类号:** X705; X52      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1673-9833(2019)06-0089-06

**引文格式:** 王 琼, 黄丽媛, 古黄玲, 等. 生物质废弃物柚子皮作为潜在吸附剂用于废水处理 [J]. 湖南工业大学学报, 2019, 33(6): 89-94.

## Biomass Waste Pomelo Peel as a Potential Adsorbent for Wastewater Treatment

WANG Qiong, HUANG Liyuan, GU Huangling, LIU Zhen

(Hunan Provincial Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Agricultural and Animal Husbandry Waste Resources, College of Urban and Environmental Sciences, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** A research has been carried out on the wastewater treatment by pomelo peel, a biomass waste, as a potential and effective low-cost adsorbent. Firstly, an introduction has been made to the physicochemical properties of pomelo peel, followed by an analysis of the reasons for its excellent adsorption properties. Then, a brief introduction has been made to the treatment performance of pomelo peel on wastewater containing heavy metals, radioactive wastewater, printing and dyeing wastewater, organic wastewater, pharmaceutical wastewater, fluorine wastewater, oily wastewater and other wastewater, with a tentative inquiry made into the feasibility of regeneration and utilization of pomelo peel as an adsorbent. The results show that pomelo peel is characterized with a good reusability and high stability, with a potential to provide a feasible, waste-to-waste, environmentally friendly method for wastewater treatment.

**Keywords:** adsorbent; biomass waste; pomelo peel; wastewater treatment

## 0 引言

合乎实际应用需要的吸附剂, 必须具备比表面积较大, 选择性较强, 吸附容量较大, 并且有足够的机械强度、热稳定性能及化学稳定性能, 来源广泛, 价格低廉等条件。活性炭, 作为一种通用吸附剂, 其

应用十分广泛。但因商业活性炭一般是由木炭、木材等制成的, 其成本较高, 这在一定程度上限制了它的广泛使用<sup>[1]</sup>。为了找到合适的商业活性炭替代品, 科研工作者们尝试利用众多的生物质废弃物、工业废弃物、城市生活垃圾、污泥、土壤和矿石材料等开发低成本吸附剂, 这成为材料领域研究的热点<sup>[2]</sup>, 其中纤

收稿日期: 2019-06-03

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2019JJ50126), 湖南省哲学社会科学基金资助项目(18JD26)

作者简介: 王 琼(1979-), 女, 湖南株洲人, 湖南工业大学讲师, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为固体废弃物的资源化利用, E-mail: 7570534@qq.com

维质的生物质废弃物是低成本吸附剂的丰富来源<sup>[3-4]</sup>。被研究的生物质废弃物种类很多,如农田废弃物(稻壳、麦壳、秸秆、谷物灰渣等)<sup>[5-7]</sup>、林业废弃物(木屑、杂草、落叶、棕榈纤维、麻杆等)<sup>[8]</sup>、水(坚)果废弃物(果皮、果壳、果核、果渣等)<sup>[9-11]</sup>等,其中也包含了柚子的果皮。

柚子是常见的水果之一,在热带和亚热带地区都有栽培,在我国福建、江西、广东、广西等许多地区大量种植。我国柚子的年产量约为450~500万t,柚子皮占柚子总质量的比例可达40%~50%,年产生果皮量约为150~250万t,在生物质组分体系中占一定份额<sup>[12]</sup>。科研工作者们对柚子皮的再利用进行了一系列研究,柚子皮在含重金属废水、放射性废水、印染废水、有机废水、医药废水、含氟废水、含油污水等各类水和废水处理中,表现出了优异的吸附性能,可作为一种潜在的生物质吸附剂加以利用。因此,本文拟对生物质废弃物柚子皮制成吸附剂的方法、吸附性能和吸附机理进行研究,以期得到可用于各类废水处理的吸附能力强、成本低廉的潜在吸附材料提供理论依据与实践参考。

## 1 柚子皮天然的吸附性能及改性研究

### 1.1 柚子皮天然的吸附性能

柚子皮具有天然的吸附性能。观察柚子皮的微观结构可以发现,柚子皮表面有的比较光滑<sup>[13]</sup>,有的呈现出层状结构<sup>[14]</sup>,有的呈现出蜂窝状结构<sup>[15]</sup>,有的显示有大量纤维组织和微孔,且孔径大小不等,一般大孔为2~20 μm,孔道管壁厚约2 μm<sup>[16]</sup>。柚子皮富含纤维素、半纤维素和木质素等,且果胶含量较高,这些不溶性组分的质量分数为50%~70%,柚子皮还含有葡萄糖、果糖、蔗糖和木糖等水溶性组分<sup>[17]</sup>,因此柚子皮中存在着大量羟基、羰基、醛基、羧基等官能团<sup>[18]</sup>,这些官能团可发挥络合作用、静电吸附作用等<sup>[19-20]</sup>。

柚子皮吸附剂因为可以释放出如 $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Na^+$ 等金属离子,这些离子可以与废水中的重金属阳离子进行离子交换;同时,柚子皮中的羧基和羟基在与金属离子的吸附过程中也扮演着重要角色<sup>[21]</sup>,可以与金属离子结合,使之去除;对于有机废水,柚子皮中的羟基、氨基、羰基、羧基、磷酸酯或硫酸酯等活性基团,是吸附双酚A、苯酚等有机污染物的特性官能团<sup>[22]</sup>。对于印染废水,由于大部分染料为阳离子型染料,在溶液中以阳离子状态存在,易与吸附剂表面带负电的基团发生相互作用而被吸附,并且带负电荷的基团越

多对吸附越有利<sup>[12, 23]</sup>;对于含油污水,因柚子皮表面粗糙、内部毛细管众多,有超强的疏水性和嗜油性,这有利于油污快速渗透,且因范德华力而被吸附<sup>[24]</sup>。吸附剂的表面酸碱性是表征其表面化学性能的重要指标,对柚子皮的表面酸碱性能进行分析,发现柚子皮表面有两性行为,具有较高的酸性。酸性主要与含氧基团(主要是羧酸、酸酐、内酯和酚类)有关,碱性与柚皮边缘存在的无氧Lewis位点、羰基、吡喃酮和苯并吡喃型结构有关<sup>[24]</sup>。对柚子皮进行元素分析发现,柚子皮不含砷、镉、钴、铬、铅等常见的有毒重金属,且其浸出液中铝、钡、铜、铁、镁、锰、镍、硅、锶、锌的含量也远低于国家《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》(GB 5085.3—2007)中重金属含量浓度限度<sup>[12]</sup>。可见,将柚子皮资源化利用作为吸附剂应用在废水处理中,可达到以废治废的目的。

### 1.2 柚子皮吸附剂的改性研究

天然柚子皮的吸附性能还有待提高,因此研究者们根据其物理化学性质和不同废水的特性,对柚子皮尝试了多种改性方法,以提高其吸附能力。

1) 采用炭化、微波活化法等增大柚子皮的比表面积。Wu Y. H. 等<sup>[13]</sup>的研究结果显示,用柚皮粉在体积分数为85%的 $H_3PO_4$ 中以 $w(PP):w(H_3PO_4)=1:2.5$ 的比例浸泡10 h后,所制备的改性柚子皮具有较高的微孔结构,所得产物在溶液pH值为2.0时的吸附容量达到了57.637 mg/g,分析结果表明,该改性柚子皮的表面有很多活化后开发出的孔隙,形成了高微孔结构。Li F. Z. 等<sup>[14]</sup>将5.0 g柚皮粉末分散在60 mL去离子水中形成固液浆,然后将浆料倒入具有四氟乙烯内衬的不锈钢高压釜内,密封后在200 °C温度条件下加热24 h,自然冷却至室温后过滤,将得到的固体产品经真空干燥,即制得吸附剂粉末。其表征结果表明,所制备的吸附剂粉末的孔隙密度增大、比表面积增大,B. E. T (Brunauer. Emmett. Teller)比表面积由2.60  $m^2/g$ 增大到1 892.10  $m^2/g$ 。K. Y. Foo 等<sup>[25]</sup>将柚皮炭与氢氧化钠NaOH溶液混合,并且 $w(NaOH):w(CHAR)=1:1.25$ ,然后放入玻璃反应器内进行微波活化。接下来将该反应器放置在一个频率为2.45 GHz的改良微波炉中,并将微波功率设定为800 W,加热周期为5 min,结果表明,活化后的柚子皮比表面积和孔径都在原来的基础上大大提高,BET比表面积可达1 335  $m^2/g$ ,柚子皮表面上有很多明显、均匀发育的毛孔,形成了有序的孔结构。微波后碳含量增加,但是氧、氢和硫的含量表现出相反的变化趋势,这是由于在激活期间部分分解了挥发性化合物和消除了含氧基团,使得能量转移很容易通

过偶极旋转转化为热量和离子传导。

2) 采用化学改性法引入新的表面基团, 改变柚子皮表面能。化学改性法主要有酸碱改性法、铁纳米颗粒改性法、有机试剂改性法等。酸碱改性法可采用 HCl、H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>、NaOH、Ca(OH)<sub>2</sub> 等对柚子皮进行改性, 改性后的柚子皮中含有的 Cl<sup>-</sup>、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>、Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup> 可以与重金属阴、阳离子之间进行离子交换, 净化含重金属的废水。酸碱皂化后的酸氧化机理与酸酐的产生有关, 反应酸酐与纤维素羟基结合形成酯键, 并将羧基引入纤维素。由于—COOH 基团的生成, 使得重金属离子的吸附能力得到提升<sup>[13, 25]</sup>, 可以去废水中的重金属阳离子。铁纳米颗粒改性法是在生物质表面包覆铁纳米颗粒, 以吸附去除重(类)金属阴离子废水, 生物质复合材料吸附去除水中六价铬的化学机制如图 1<sup>[26]</sup> 所示。王琼<sup>[27]</sup>、付宏渊<sup>[28]</sup> 等采用铁盐改性柚子皮, 在柚子皮表面形成的铁纳米颗粒, 增强了对水中六价铬和砷的吸附去除能力。有机试剂改性法即采用有机试剂对柚子皮表面进行改性, 可用于含油污水的处理, 例如 Chai W. B. 等<sup>[15]</sup> 采用乙酸酐和苯乙烯使柚子皮乙酰化, 增大其表面粗糙度, 降低其表面能, 使得油滴可以在不到 1 s 的时间内迅速渗透到改性柚子皮中与油接触, 大大提高了柚子皮粉的疏水性能和吸油性能。

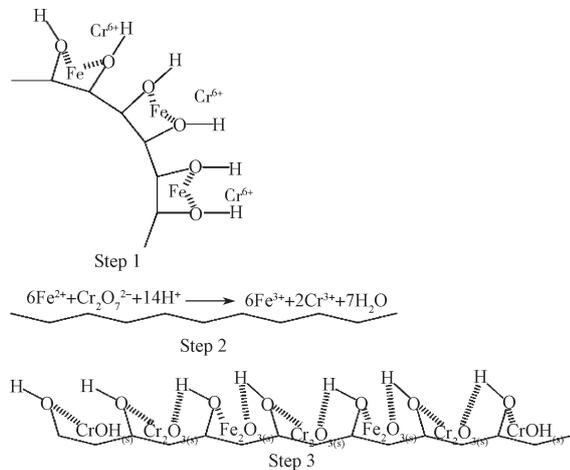


图 1 生物质复合材料吸附去除水中六价铬的化学机制  
Fig. 1 Chemical mechanism of adsorption and removal of hexavalent chromium from water by biomass composites

3) 采用复合改性法全面提高柚子皮的吸附性能。Li H. Z. 等<sup>[24]</sup> 的研究中, 将预炭化的柚子皮与 KOH 均匀混合后再在高温下活化, 提高了其对染料甲基橙的吸附性能。炭化后柚子皮的孔隙密度和比表面积均增大, 表面基团和表面能均发生较大变化, 新的基团被引入。Wang J. G. 等<sup>[29]</sup> 以柚子皮为原材料, 将高温炭化的柚皮炭浸入聚吡咯溶液中, 并以 FeCl<sub>3</sub> 为氧

化剂进行改性, 以改变柚子皮的表面电位, 且引入了 Cl<sup>-</sup> 等阴离子, 不仅提高了其对水中阴离子的吸附交换容量(如图 2 所示), 且柚子皮的比表面积和活性点位也大大增加。

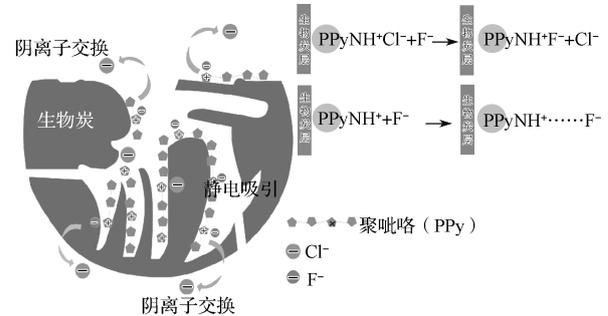


图 2 改性柚子皮对水中 F<sup>-</sup> 的吸附机理

Fig. 2 Adsorption mechanism of F<sup>-</sup> removal by modified pomelo peel

由以上改性方法可知: 可以针对不同的水中污染物, 结合柚子皮本身的物理化学性质进行改性, 通过对原始柚子皮表面粗糙程度的改变、内部维度形状结构的改变、孔径大小的改变、表面基团和表面能的改变等, 使得柚子皮表面的吸附点位得到充分开发与利用, 生成新的化学组成与化学结构, 从而高效地、选择性地吸附水中的污染物。

## 2 柚子皮在废水处理中的研究状况

柚子皮及其改性产物已被研究用于含重金属废水、放射性废水、印染废水、有机废水、医药废水、含氟废水、含油污水等各类废水处理中, 表 1 列出了近年来国内外在利用柚子皮吸附剂处理废水中各类污染物的主要研究成果。

分析表 1 可以得知, 柚子皮的吸附性能整体表现较为优异, 尤其是对于印染废水和含油污水的处理, 原始柚子皮对结晶紫、甲基紫和柴油的最大吸附量分别可达 254.16 mg/g<sup>[17]</sup>、468.3 mg/g<sup>[32]</sup> 和 27 980 mg/g<sup>[35]</sup>。而改性后的柚子皮吸附性能均有所提高, 经 H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 炭化后的柚子皮对 Cr(VI) 的吸附容量达 57.64 mg/g, 优于活性炭-铸铁复合吸附柱对 Cr(VI) 的吸附容量 3.806 mg/g<sup>[36]</sup>; FeCl<sub>3</sub> 改性后的柚子皮对水中的 As(III) 的吸附容量为 1.86 mg/g, 优于煤基活性炭对 As(III) 的吸附容量 1.634 mg/g<sup>[37]</sup>; 绝大部分吸附等温线可以用 Langmuir 等温方程进行描述, 吸附速率可以用拟二级动力学方程进行描述。分析这些研究可以得知, 柚子皮的吸附过程是一个放热过程, 其吸附行为是自吸吸附, 并且污染物在柚子皮孔隙中的扩散不是唯一的吸附速率控制步骤, 这个吸附过程可能受多个步骤的共同控制。

表1 柚子皮在废水处理中的研究成果

Table 1 Research results of pomelo peel for wastewater treatment

废水种类	吸附质	改性方法	最大吸附量 / ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )	吸附条件	等温吸附式	吸附动力学	参考文献
含重金属	Cr(VI)	$\text{H}_3\text{PO}_4$ 炭化	57.64	$T=35^\circ\text{C}$ , pH 值=2	Langmuir	拟二级动力学	[13]
	Ni(II)	-	46.13	$T=20\sim 50^\circ\text{C}$ , pH 值=2~8	Freundlich, Langmuir	拟二级动力学	[21]
	Cd(II)	-	42.09	$T=20\sim 50^\circ\text{C}$ , pH 值=2~8	Freundlich, Langmuir	拟二级动力学	[21]
	Cd(II)	-	21.83	$T=25^\circ\text{C}$ , pH 值=1~5	Langmuir	拟二级动力学	[30]
	As(III)	$\text{FeCl}_3$	1.86	$T=25^\circ\text{C}$ , pH 值=2	Langmuir	拟二级动力学	[27]
放射性	Cu(II)	果胶脱除	21.1	$T=25^\circ\text{C}$ , pH 值=4	Langmuir	拟二级动力学	[31]
	U(VI)	水热炭化	436.4	$T=25^\circ\text{C}$ , pH 值=4.5	Langmuir	拟二级动力学	[14]
	结晶紫	-	254.16	$T=45^\circ\text{C}$ , pH 值=6	Langmuir	拟二级动力学	[17]
印染	甲基橙	KOH 炭化	680.2	$T=0^\circ\text{C}$ , pH 值=3~12	Langmuir	拟二级动力学	[24]
	酸性蓝 15	微波活化	444.45	$T=30^\circ\text{C}$ , pH 值=2~12	Langmuir	-	[25]
	活性蓝 114	-	16	$T=30^\circ\text{C}$ , pH 值=2.0	Langmuir	拟二级动力学	[31]
	亚甲基蓝	-	133	$T=30^\circ\text{C}$ , pH 值=8.0	Langmuir, TemKin	-	[32]
	亚甲基蓝	微波活化	501.10	$T=30^\circ\text{C}$ , pH 值=2~12	Langmuir	-	[25]
	甲基紫 2B	-	468.3	$T=25^\circ\text{C}$ , pH 值=3~6	Langmuir	拟二级动力学	[33]
含氟	$\text{F}^-$	聚吡咯 + 炭化	18.52	$T=25^\circ\text{C}$ , pH 值=2.8~10	Langmuir	拟二级动力学	[29]
有机	双酚 A	炭化	8.817	$T=25^\circ\text{C}$ , pH 值 < 9.59	Freundlich, Dual-Mode	-	[22]
医药	环丙沙星	$\text{H}_3\text{PO}_4$ 炭化	400	$T=25^\circ\text{C}$ , pH 值=2.5~12	Langmuir	拟二级动力学	[34]
含油	柴油	-	27 980	$T=30^\circ\text{C}$	Freundlich	拟二级动力学	[35]
	润滑油	苯乙烯	26 360	$T=50\sim 80^\circ\text{C}$	-	拟二级动力学	[15]

### 3 柚子皮的解吸和再生利用研究

吸附剂的再生利用情况关系到其进行实际应用的可行性,关于柚子皮吸附剂的解吸和再生利用也有部分研究。Chai W. B. 等<sup>[15]</sup>采用正己烷萃取法,从吸附饱和了油的柚子皮吸附剂样品中分离油,萃取 10 min 后,将样品置于  $60^\circ\text{C}$  的烘箱中烘干 16 h, 所得油饱和样品经正己烷萃取循环 9 次后的吸附/解吸吸附效果良好。A. Saeed 等<sup>[17]</sup>将在 pH 值为 6.0、温度为  $30^\circ\text{C}$ 、结晶紫质量浓度为  $100\text{ mg/L}$  条件下吸附饱和的柚子皮,置于 50 mL 的  $1\text{ mol/L}$  NaOH 作为染料的解吸剂中,在旋转摇床上以  $100\text{ r/min}$  转速振荡 60 min 后离心分离,测定回收的结晶紫染料量,结果显示解吸非常迅速,前 30 min 内的解吸率为 82%,总解吸率达 98.25%。再生的柚子皮被再次用于去除结晶紫,发现其在第二和第三次循环中分别具有 87% 和 81% 的解吸率。Wang J. G. 等<sup>[29]</sup>分别选用  $0.1\text{ mol/L}$  的 NaOH 和  $0.1\text{ mol/L}$  的 HCl 作为解吸剂和活化剂,从吸附饱和了的改性柚皮炭中解吸  $\text{F}^-$  离子,进行了 4 次再生循环,结果显示吸附剂的重复使用性能良好。M. Torab-Mostaedi 等<sup>[21]</sup>采用  $0.1\text{ mol/L}$  的 HCl 作为解吸剂,从吸附饱和的柚子皮中解吸 Cd(II) 和 Ni(II),经过连续 5 次的吸附-解吸循环,解吸率超过 97%。Li H. Z. 等<sup>[24]</sup>采用  $0.1\text{ mol/L}$   $\text{HNO}_3$  和去离子水进行解吸、洗涤,并在  $60^\circ\text{C}$  条件下真空干燥,表征结果显示,改性柚子皮在去除甲基橙过程中可

循环利用,在重复使用 5 个周期之后,吸附率仍超过 92%。

以上研究表明,柚子皮及其改性物具有良好的可重复利用性和较高的稳定性,但这些研究均处于实验室研究阶段,受柚子皮产量及回收成本等因素的影响,暂未进行实际工程应用。

### 4 结论和建议

柚子皮天然的吸附能力使得其具有良好的去除水中污染物的能力,在此基础上,根据其性质和水中污染物类型进行针对性地改性,能在一定程度上增大其吸附性能并进行选择性吸附。柚子皮及其改性产品具有良好的可重用性和较高的稳定性,是一种潜在的、有效的可吸附去除水中各类污染物的吸附剂,但如果要从工业化应用的角度进一步实现柚子皮的综合利用,尚需在以下方面加大研究:

1) 采集各种品种和产地的柚子皮,全面、综合地分析其物理化学性质,掌握(改性)柚子皮去除水中污染物的吸附作用机制和改性强化吸附性能的原因,以形成较为全面的、有针对性吸附去除某类型污染物改性柚子皮的科学性理论指导。

2) 全面探索(改性)柚子皮吸附(解吸)各类型污染物的行为规律和影响机制,对吸附过程进行行为预测和定量描述;对(改性)柚子皮的解吸和再生利用进一步研究,以提供全面可靠的数据指导其进行

实际应用。

3) 在以上理论研究的基础上, 进行针对实际工业废水的应用研究和放大实验, 形成对柚子皮吸附剂工业化应用的可行性以及与传统吸附剂进行对比的综合评估。

4) 进一步拓宽柚子皮吸附材料的应用范围, 如可将其制作成人工湿地的填料或用于重金属污染土壤的修复。

以上各方面的研究, 对农业废弃物柚子皮的资源化利用和开发低成本的、有效的废水处理(土壤修复)的吸附剂方面均有较为重要的科学指导意义。

#### 参考文献:

- [1] BHATNAGAR A, SILLANPÄÄ M. Utilization of Agro-Industrial and Municipal Waste Materials as Potential Adsorbents for Water Treatment: A Review[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, 157(2/3): 277-296.
- [2] DE GISI S, LOFRANO G, GRASSI M, et al. Characteristics and Adsorption Capacities of Low-Cost Sorbents for Wastewater Treatment: A Review[J]. *Sustainable Materials and Technologies*, 2016, 9: 10-40.
- [3] NGUYEN T A H, NGO H H, GUO W S, et al. Applicability of Agricultural Waste and By-Products for Adsorptive Removal of Heavy Metals from Wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 148: 574-585.
- [4] NOOR N M, OTHMAN R, MUBARAK N M, et al. Agricultural Biomass-Derived Magnetic Adsorbents: Preparation and Application for Heavy Metals Removal[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2017, 78: 168-177.
- [5] SUGASHINI S, BEGUM K M M S, RAMALINGAM A. Removal of Cr(VI) Ions Using Fe-Loaded Chitosan Carbonized Rice Husk Composite Beads (Fe-CCRCB): Experiment and Quantum Chemical Calculations[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2015, 208: 380-387.
- [6] GEORGIEVA V G, TAVLIEVA M P, GENIEVA S D, et al. Adsorption Kinetics of Cr(VI) Ions from Aqueous Solutions Onto Black Rice Husk Ash[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2015, 208: 219-226.
- [7] GAO H, LIU Y G, ZENG G M, et al. Characterization of Cr(VI) Removal from Aqueous Solutions by a Surplus Agricultural Waste: Rice Straw[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 150(2): 446-452.
- [8] GOUAMID M, OUAHRANI M R, BENSACI M B. Adsorption Equilibrium, Kinetics and Thermodynamics of Methylene Blue from Aqueous Solutions Using Date Palm Leaves[J]. *Energy Procedia*, 2013, 36: 898-907.
- [9] BHATNAGAR A, SILLANPÄÄ M, WITEK-KROWIAK A. Agricultural Waste Peels as Versatile Biomass for Water Purification: A Review[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 270: 244-271.
- [10] LIM L B L, PRIYANTHAN, TENNAKOON D T B, et al. Breadnut Peel as a Highly Effective Low-Cost Bio-sorbent for Methylene Blue: Equilibrium, Thermodynamic and Kinetic Studies[J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2017, 10: S3216-S3228.
- [11] PAPS, RADONIĆ J, TRIFUNOVIĆ S, et al. Evaluation of the Adsorption Potential of Eco-Friendly Activated Carbon Prepared from Cherry Kernels for the Removal of Pb<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup> and Ni<sup>2+</sup> from Aqueous Wastes[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 184: 297-306.
- [12] 周 殷, 胡长伟, 李 鹤, 等. 柚子皮吸附剂的物化特性研究 [J]. *环境科学与技术*, 2010, 33 (11): 87-91.  
ZHOU Yin, HU Changwei, LI Cherry, et al. Physico-Chemical Characteristics of Pummelo Peel Adsorbent[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33 (11): 87-91.
- [13] WU Y H, CHA L G, FAN Y A, et al. Activated Biochar Prepared by Pomelo Peel Using H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> for the Adsorption of Hexavalent Chromium: Performance and Mechanism[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2017, 228(10): 405.
- [14] LI F Z, TANG Y, WANG H L, et al. Functionalized Hydrothermal Carbon Derived from Waste Pomelo Peel as Solid-Phase Extractant for the Removal of Uranyl from Aqueous Solution[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(28): 22321-22331.
- [15] CHAI W B, LIU X Y, ZOU J C, et al. Pomelo Peel Modified with Acetic Anhydride and Styrene as New Sorbents for Removal of Oil Pollution[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 132: 245-251.
- [16] ZHOU H W, YAN B, LAI J L, et al. Renewable Biomass Derived Hierarchically Porous Carbonaceous Sponges and Their Magnetic Nanocomposites for Removal of Organic Molecules from Water[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2018, 58: 334-342.
- [17] SAEED A, SHARIF M, IQBAL M. Application Potential of Grapefruit Peel as Dye Sorbent: Kinetics, Equilibrium and Mechanism of Crystal Violet Adsorption[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 179(1/2/3): 564-572.
- [18] PAVAN F A, LIMA E C, DIAS S L P, et al. Methylene Blue Biosorption from Aqueous Solutions by Yellow Passion Fruit Waste[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 150(3): 703-712.

- [19] HAMEED B H, MAHMOUD D K, AHMAD A L. Sorption of Basic Dye from Aqueous Solution by Pomelo (*Citrus Grandis*) Peel in a Batch System[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2008, 316(1/2/3): 78–84.
- [20] BULUT Y, AYDIN H. A Kinetics and Thermodynamics Study of Methylene Blue Adsorption on Wheat Shells[J]. *Desalination*, 2006, 194(1/2/3): 259–267.
- [21] TORAB-MOSTAEDI M, ASADOLLAHZADEH M, HEMMATI A, et al. Equilibrium, Kinetic, and Thermodynamic Studies for Biosorption of Cadmium and Nickel on Grapefruit Peel[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2013, 44(2): 295–302.
- [22] LI J, LIANG N, JIN X Q, et al. The Role of Ash Content on Bisphenol a Sorption to Biochars Derived from Different Agricultural Wastes[J]. *Chemosphere*, 2017, 171: 66–73.
- [23] ARGUN M E, GÜCLÜ D, KARATAS M. Adsorption of Reactive Blue 114 Dye by Using a New Adsorbent: Pomelo Peel[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2014, 20(3): 1079–1084.
- [24] LI H Z, SUN Z B, ZHANG L, et al. A Cost-Effective Porous Carbon Derived from Pomelo Peel for the Removal of Methyl Orange from Aqueous Solution[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2016, 489: 191–199.
- [25] FOO K Y, HAMEED B H. Microwave Assisted Preparation of Activated Carbon from Pomelo Skin for the Removal of Anionic and Cationic Dyes[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 173(2): 385–390.
- [26] LÓPEZ-TÉLLEZ G, BARRERA-DÍAZ C E, BALDERAS-HERNÁNDEZ P, et al. Removal of Hexavalent Chromium in Aquatic Solutions by Iron Nanoparticles Embedded in Orange Peel Pith[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 173(2): 480–485.
- [27] 王琼, 付宏渊, 何忠明, 等. FeCl<sub>3</sub> 改性柚子皮吸附去除水中的砷[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(4): 2137–2144.
- WANG Qiong, FU Hongyuan, HE Zhongming, et al. Adsorption Removal of Arsenic in Aqueous Solution by FeCl<sub>3</sub>-Modified Pomelo Peel[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(4): 2137–2144.
- [28] 付宏渊, 邱祥, 王琼, 等. 铁盐改性柚子皮对含铬废水的吸附性能[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(9): 2271–2278.
- FU Hongyuan, QIU Xiang, WANG Qiong, et al. Adsorption Performance of Fe(III)-Modified Pomelo Peel on Wastewater Containing Cr(VI) [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2017, 48(9): 2271–2278.
- [29] WANG J G, CHEN N, LI M, et al. Efficient Removal of Fluoride Using Polypyrrole-Modified Biochar Derived from Slow Pyrolysis of Pomelo Peel: Sorption Capacity and Mechanism[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2018, 26(4): 1559–1572.
- [30] SAIKAEW W, KAEWSARN P, SAIKAEW W. Pomelo Peel: Agricultural Waste for Biosorption of Cadmium Ions from Aqueous Solutions[J]. *World Academy of Science, Engineering and Technology International*, 2009, 3(8): 4626–4633.
- [31] TASASO P. Adsorption of Copper Using Pomelo Peel and Depectinated Pomelo Peel[J]. *Journal of Clean Energy Technologies*, 2014, 2(2): 154–157.
- [32] HOU S X. Adsorption Properties of Pomelo Peels Against Methylene Blue in Dye Wastewater[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 634/635/636/637/638: 178–181.
- [33] DAHRI M K, KOOH M R R, LIM L B L. Artificial Neural Network Approach for Modelling of Methyl Violet 2B Dye Adsorption Using Pomelo Skin[J]. *Journal of Environment & Biotechnology Research*, 2017, 6(3): 238–247.
- [34] SUN Y Y, LI H, LI G C, et al. Characterization and Ciprofloxacin Adsorption Properties of Activated Carbons Prepared from Biomass Wastes by H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> Activation[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 217: 239–244.
- [35] ZOU J C, CHAI W B, LIU X Y, et al. Magnetic Pomelo Peel as a New Adsorption Material for Oil-Polluted Water[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2016, 57(27): 12536–12545.
- [36] HUANG D D, WANG G C, SHI Z M, et al. Removal of Hexavalent Chromium in Natural Groundwater Using Activated Carbon and Cast Iron Combined System[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 165: 667–676.
- [37] GONG X J, LI W G, ZHANG D Y, et al. Adsorption of Arsenic from Micro-Polluted Water by an Innovative Coal-Based Mesoporous Activated Carbon in the Presence of Co-Existing Ions[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2015, 102: 256–264.

(责任编辑: 廖友媛)