

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.06.008

不同方法改性柚皮制备的活性炭吸附亚甲基蓝试验

孙晓旭¹,徐进¹,储智强²

(1.南京工程学院环境工程学院,江苏南京 211167; 2.上海鹏纶机电设备有限公司,上海 201100)

摘要:采用不同方法对柚子皮改性后制备活性炭,考察溶液 pH 值、活性炭投加量、亚甲基蓝初始质量浓度、吸附时间等因素对吸附效果的影响,并对吸附动力学和吸附机理进行了探讨。结果表明,在最佳条件下未改性和采用氯化铝、硫化钠、氢氧化钾改性柚子皮制备的 4 种活性炭对亚甲基蓝的脱色率分别为 84.5%、87.3%、91.1%和 95.5%。分析不同活性炭平衡吸附量的值可以得出结论:经过氯化铝和氢氧化钾改性的柚子皮制备的活性炭吸附亚甲基蓝的能力明显提高;4 种活性炭对亚甲基蓝的吸附过程均符合准二级动力学模型;氯化铝和氢氧化钾改性柚子皮制备的活性炭表面包含更多的有机官能团,这与活性炭对应较高的亚甲基蓝废水初始质量浓度和高的平衡吸附量是一致的。

关键词:柚子皮;活性炭;亚甲基蓝;改性;吸附动力学

中图分类号:X703.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2021)06-0536-07

Experimental study of absorption of methylene blue with activated carbon prepared by modification pomelo peel in different methods

SUN Xiaoxu¹, XU Jin¹, CHU Zhiqiang²

(1. School of Environmental Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;
2. Shanghai Penglun Electromechanical Equipment Limited Company, Shanghai 201100, China)

Abstract: In this study, activated carbons were prepreed by the modified grapefruit peel with different methods. The effects of the pH value, the dosage of activated carbon, the initial concentration of methylene blue and the adsorption time on the adsorption effect were investigated. The adsorption kinetics and adsorption mechanism were also discussed. The results showed that under the optimal conditions, the removal rates of methylene blue by four activated carbons were 84.5% (unmodified), 87.3% (modified by aluminum chloride impregnation method), 91.1% (modified by sodium sulfide activation), and 95.5% (modified by potassium hydroxide activation), respectively. Comparing the value of the equilibrium adsorption capacity of different activated carbons, the activated carbons prepared from modified pomelo peel with aluminum chloride and potassium hydroxide had a significantly improved adsorption ability. The analysis of adsorption kinetics showed that the adsorption process of methylene blue on four kinds of activated carbons all accorded with the quasi-second-order kinetic model. The surface of activated carbons prepared from modified pomelo peel with aluminum chloride and potassium hydroxide contained many organic functional groups, which was consistent with the higher initial concentration of methylene blue wastewater and high equilibrium adsorption of activated carbons.

Key words: grapefruit peel; activated carbon; methylene blue; modification; adsorption kinetics

染料废水是国内外公认的难处理的工业废水之一,其成分复杂、色度高、难降解、有毒物质多。受染料废水污染的水体透光量减小,影响了水生植物的光合作用,而有些染料或其降解产物有毒^[1-2],严重威胁了水生动植物和人类的健康。目前,处理染料废水的方法有化学混凝法、生化法、吸附法、高级氧化法等,其中活性炭吸附法处理量大、反应时间短、无毒害物质产生,是目前较为理想的废水脱色方法^[3-5]。然而由于活性炭再生困难、成本高,一般应用于浓度较低的染料废水处理或深度处理中。近年来,国内外学者开始研究寻找新的廉价易得的生物质吸附材料^[6],如芦苇、稻壳、花生壳、锯末和梧桐树落叶等。柚子是南方较常见的一种水果,柚子皮呈丰富的多孔结构,且白色絮状层中富含纤维素,是一种理想的吸附剂材料^[7-12]。柚子皮具有

作者简介:孙晓旭(1983—),女,讲师,博士研究生,主要从事水文与水污染控制研究。E-mail:hjsunxiaoxu@njit.edu.cn

引用本文:孙晓旭,徐进,储智强.不同方法改性柚皮制备的活性炭吸附亚甲基蓝试验[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(6):536-542.

SUN Xiaoxu,XU Jin,CHU Zhiqiang. Experimental study of absorption of methylene blue with activated carbon prepared by modification pomelo peel in different methods[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2021,49(6):536-542.

天然的吸附性能,但是其吸附性还有很大的提高空间,前人根据其物理、化学性质和不同废水的特性,采用了多种方法对柚子皮进行改性以提高其吸附能力^[13-16],如对柚子皮进行适度的炭化处理,制成孔隙结构发达、比表面积高的活性炭。将柚子皮进行合理的资源利用,对环境和资源的可持续发展具有重要的意义^[17-18]。

亚甲基蓝属于阳离子染料,广泛存在于染料废水中^[19]。本文以亚甲基蓝为研究对象,采用柚子皮活性炭进行吸附试验,考察溶液 pH 值、活性炭投加量、亚甲基蓝初始质量浓度、吸附时间等因素对吸附效果的影响,并对吸附动力学和吸附机理进行研究。

1 材料与方法

1.1 柚子皮活性炭的制备

采用市售的广西容县沙田柚,剥下柚子的黄色表皮,剪成小块,用蒸馏水冲洗干净后晾晒 2 d,置于 105℃ 烘箱中干燥 10 h,密封保存,备用。采用 3 种较常用的化学药剂(氯化铝、硫化钠和氢氧化钾)对柚子皮进行改性,引入新的表面基团,再制备活性炭进行吸附试验。

1.1.1 柚子皮的改性

a. 氯化铝改性。取干燥的柚子皮粉,按照质量比为 50 : 1 的比例,称取柚子皮粉和结晶氯化铝,将两者加水混合,常温下搅拌 15 min 使其混合均匀,置于 105℃ 烘箱中烘干。

b. 硫化钠改性。取自然风干切成小块的柚子皮,按固液比 1 : 5 (1 g 柚子皮对应 5 mL 硫化钠溶液)的比例加入浓度为 1.5 mol /L 的硫化钠溶液,搅拌均匀,于室温下静置 12 h 后过滤,用蒸馏水多次清洗至中性,然后置于 105℃ 烘箱中烘干。

c. 氢氧化钾改性。取自然风干切成小块的柚子皮,以 KOH 溶液为活化剂,将柚子皮与 KOH (25%) 溶液按照固液比 1 : 3 (1 g 柚子皮对应 3 mL 氢氧化钾溶液)的比例混合,浸渍 12 h 后过滤,用蒸馏水多次清洗至中性,然后置于 105℃ 烘箱中烘干。

1.1.2 活性炭的制备

将未改性和改性后的柚子皮置于马弗炉中 600℃ 下炭化 1 h 后取出,自然冷却,粉碎,过 100 目筛,取过筛后粉末置于干燥箱中保存备用。共制备了 4 种活性炭,未改性柚子皮直接制备活性炭 (PP₁)、氯化铝改性柚子皮制备的活性炭 (PP₂)、硫化钠改性柚子皮制备的活性炭 (PP₃) 和氢氧化钾改性柚子皮制备的活性炭 (PP₄)。活性炭制备完成后,取部分活性炭进行红外光谱测定(红外光谱仪 TENSOR27,德国 Bruker 公司),以了解不同活性炭的化学特性。

1.2 吸附试验设计

共考察溶液 pH 值、活性炭投加量、亚甲基蓝初始质量浓度、吸附时间等因素对吸附效果的影响,吸附试验中每个样品均取 50 mL 废水,亚甲基蓝初始质量浓度变化范围为 20 ~ 500 mg/L,溶液 pH 值范围为 3 ~ 12,活性炭投加量为 0.025 ~ 0.225 g,吸附时间的变化范围为 10 ~ 210 min。

1.3 吸附效果分析方法

取吸附后的水样,过滤,用分光光度计在 664 nm 处测得滤液吸光度 A₁,按下式计算脱色率 p:

$$p = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\%$$

式中:A₀——处理前水样的吸光度;A₁——吸附处理后水样的吸光度。

通过下式计算吸附量:

$$Q = (C_0 - C_t) V / W$$

式中:Q——活性炭吸附量,mg/g;C₀——亚甲基蓝的初始质量浓度,mg/L;C_t——t 时刻亚甲基蓝的质量浓度,mg/L;V——所取含亚甲基蓝水样的体积,L;W——加入的活性炭的质量,g。达到吸附平衡时对应的吸附量为活性炭的平衡吸附量。

2 结果与分析

2.1 初始质量浓度对吸附效果的影响

分别准确量取 50 mL 亚甲基蓝溶液置于 250 mL 锥形瓶中,控制其他变量不变,每个锥形瓶中均投加

0.1 g 活性炭,在室温下振荡吸附 120 min,测得滤液吸光度,根据式(1)和式(2)分别计算脱色率和吸附量,当脱色率最大时对应的质量浓度为最佳初始质量浓度。亚甲基蓝初始质量浓度与脱色率、吸附量的关系如图 1 所示。

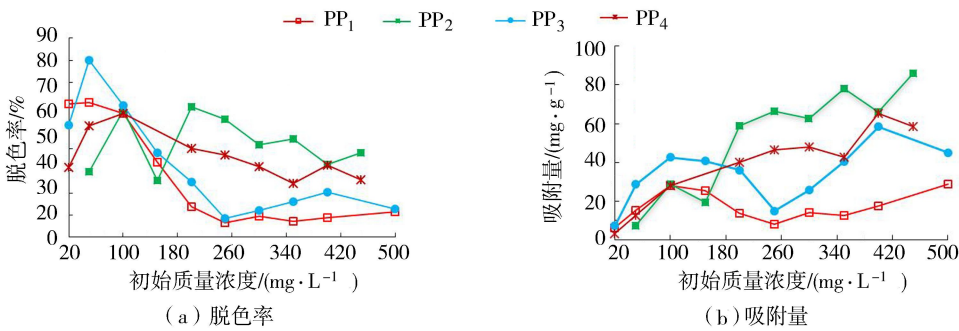


图1 初始质量浓度与脱色率和吸附量的关系

Fig.1 Relationship between initial concentration and decolorization rate, adsorption capacity

从图 1 可以看出,不同的活性炭对应的最佳初始质量浓度不尽相同。活性炭 PP₁,亚甲基蓝初始质量浓度为 50 mg/L 时,亚甲基蓝的脱色率最高为 61%,但吸附量仅为 15 mg/g;活性炭 PP₂,亚甲基蓝初始质量浓度为 200 mg/L 时脱色率最大,达 59%,吸附量达 59 mg/g;活性炭 PP₃,亚甲基蓝初始质量浓度为 50 mg/L 时脱色率最大,为 80%,吸附量为 29 mg/g;活性炭 PP₄,亚甲基蓝初始质量浓度为 100 mg/L 时,脱色率最大为 56%,对应的吸附量为 28 mg/g。对比分析可以看出,活性炭 PP₂对应的亚甲基蓝最佳初始质量浓度和吸附量均较高。

2.2 活性炭投加量对吸附效果的影响

通过亚甲基蓝初始质量浓度对吸附效果的影响分析可以看出,4 种活性炭亚甲基蓝最佳初始质量浓度分别为 50 mg/L (PP₁)、200 mg/L (PP₂)、50 mg/L (PP₃) 和 100 mg/L (PP₄)。配制对应质量浓度的亚甲基蓝溶液,分别准确量取 50 mL 溶液置于 9 个 250 mL 锥形瓶中,控制其他变量不变,依次在锥形瓶中投加 0.025 g、0.050 g、0.075 g、0.100 g、0.125 g、0.150 g、0.175 g、0.200 g 和 0.225 g 活性炭,在室温下振荡 120 min,测得滤液吸光度,计算脱色率和吸附量。活性炭投加量与脱色率、吸附量的关系如图 2 所示。

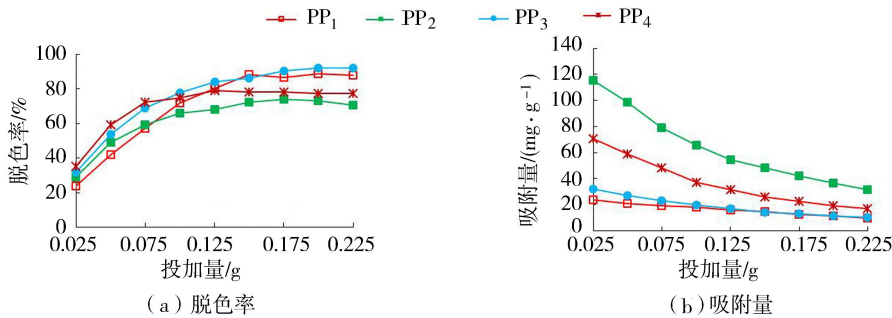


图2 活性炭投加量与脱色率和吸附量的关系

Fig.2 Relationship between activated carbon dosage and decolorization rate, adsorption capacity

从图 2(a)可以看出,随着投加量的增加,亚甲基蓝的脱色率逐渐增加,并趋于稳定。活性炭 PP₁,投加量为 0.150 ~ 0.225 g 时,脱色率最高(87% ~ 89%),最佳投加量为 0.15 g;活性炭 PP₂,投加量为 0.15 ~ 0.225 g 时,脱色率最高(71% ~ 74%),最佳投加量为 0.150 g;活性炭 PP₃,投加量为 0.175 ~ 0.225 g 时,脱色率最高(90% ~ 92%),最佳投加量为 0.175 g;活性炭 PP₄,投加量为 0.125 ~ 0.225 g 时,脱色率最高(77% ~ 79%),最佳投加量为 0.125 g。从图 2(b)可以看出,随着活性炭投加量的增加,吸附量不断变小,对应最佳初始质量浓度高的活性炭(PP₂),其吸附量也最大。

2.3 溶液 pH 值对吸附效果的影响

配制活性炭对应的最佳初始质量浓度的亚甲基蓝溶液,分别准确量取 50 mL 溶液置于 8 个 250 mL 锥形瓶中,用盐酸和氢氧化钠调节 pH 值,分别将锥形瓶中溶液的 pH 值调节成 3、5、7、8、9、10、11、12,控制其他变

量不变,向每个锥形瓶中加入最佳投加量的活性炭,在室温下振荡 120 min,测得滤液吸光度,计算脱色率和吸附量。溶液 pH 值与脱色率、吸附量的关系如图 3 所示。

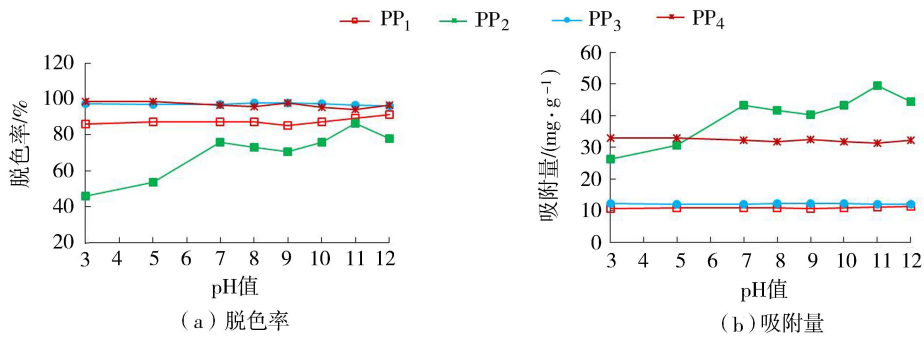


图 3 溶液 pH 值与脱色率和吸附量的关系

Fig.3 Relationship between pH value and decolorization rate, adsorption capacity

从图 3(a)可以看出,对于活性炭 PP₁、PP₃和 PP₄,溶液 pH 值变化时脱色率基本稳定,因此可以看出溶液的 pH 值对这 3 种活性炭的吸附效果影响不大,这与陆蓉等^[20]得出的结果是一致的。随着 pH 值的升高,活性炭 PP₂对亚甲基蓝的去除率不断升高,当溶液 pH 值为 11 时,脱色率最大(87%),因此得出最佳 pH 值为 11。这是因为亚甲基蓝为阳离子型染料,在溶液中以阳离子状态存在,容易与吸附剂表面带负电的基团发生相互作用而被吸附,且吸附剂表面带负电的基团越多对吸附越有利,酸性环境下,活性炭表面的基团会与溶液中的 H⁺结合。随着溶液 pH 值的升高,活性炭表面带负电的基团增多,对亚甲基蓝的吸附量也随之增大^[10]。图 3(b)显示,氯化铝改性柚子皮制备的活性炭(PP₂)在最佳 pH 值时吸附量达 46 mg/g。

2.4 吸附时间对吸附效果的影响

分别准确量取 50 mL 亚甲基蓝废水(活性炭对应的最佳初始质量浓度),置于 8 个 250 mL 锥形瓶中,每个锥形瓶加入最佳投加量的活性炭,控制最佳 pH 值,在室温下分别振荡 20 min、40 min、60 min、90 min、120 min、150 min、180 min、210 min,测得滤液吸光度,计算脱色率和吸附量。吸附时间 *t* 与脱色率、吸附量的关系如图 4 所示。

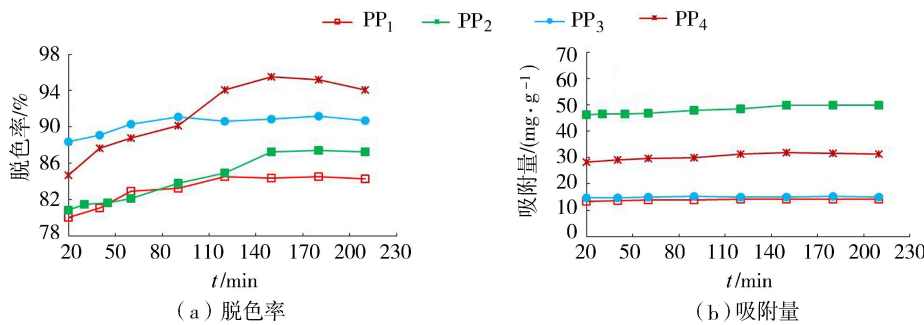


图 4 吸附时间与脱色率和吸附量的关系

Fig.4 Relationship between adsorption time and decolorization rate, adsorption capacity

从图 4(a)可以看出,随着吸附时间的延长,脱色率逐渐增大,达到一定的时间后脱色率基本稳定,因此活性炭 PP₁、PP₂、PP₃和 PP₄分别对应的最佳吸附时间为 120 min、150 min、90 min 和 150 min,在最佳条件下,活性炭 PP₁、PP₂、PP₃和 PP₄对亚甲基蓝的脱色率分别为 84.5%、87.3%、91.1%和 95.5%。达到最佳吸附时间时,对应的吸附量为活性炭的平衡吸附量,活性炭 PP₁、PP₂、PP₃和 PP₄的平衡吸附量分别为 14 mg/g、50 mg/g、15 mg/g 和 31 mg/g(图 4(b))。根据亚甲基蓝废水初始质量浓度对吸附效果的影响分析,活性炭 PP₂对应的最佳初始质量浓度最高(200 mg/L),因此在达到最佳吸附时间时其平衡吸附量也最大。

2.5 吸附动力学分析

选用适当的动力学模型对吸附过程进行拟合,能够更加深入地阐述活性炭对染料的吸附行为。本文采用 3 种常见的动力学模型进行拟合。

a. 准一级动力学方程^[21]。采用 Lagergren 方程计算:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - \frac{k_1 t}{2.303}$$

(3)

式中: q_e ——达到平衡时活性炭对染料的吸附量,mg/g; q_t —— t 时刻活性炭对染料的吸附量,mg/g; k_1 ——准一级吸附速率常数,min⁻¹。

根据已知数据计算 $\ln(q_e - q_t)$,以 t 为横坐标、 $\ln(q_e - q_t)$ 为纵坐标作图,并对数据点进行线性拟合,结果如图 5 所示。

b. 准二级动力学方程^[21]。其表达式为

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$$

(4)

式中: k_2 ——准二级吸附速率常数,g/(mg·min)。

计算 t/q_t 的值,以 t 为横坐标、 t/q_t 为纵坐标作图,并对数据点进行线性拟合,结果如图 6 所示。

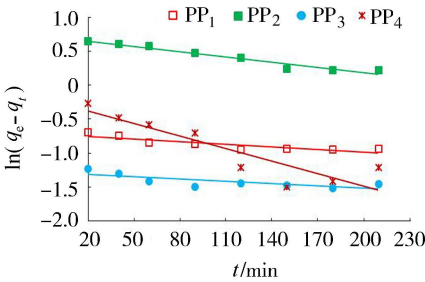


图 5 4 种活性炭吸附亚甲基蓝的准一级动力学曲线
Fig.5 Quasi-first order kinetic curves of methylene blue adsorption on four kinds of activated carbon

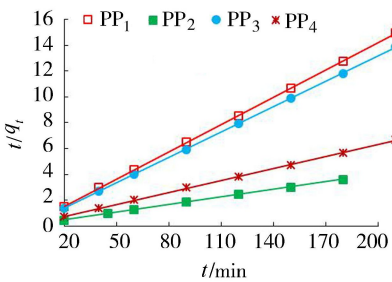


图 6 4 种活性炭吸附亚甲基蓝的准二级动力学曲线
Fig.6 Quasi-second-order kinetic curves of methylene blue adsorption on four kinds of activated carbon

c. 颗粒内扩散方程。其表达式为

$$q_t = k_p t^{0.5} + C$$

(5)

式中: k_p ——颗粒内扩散速率常数,mg/(g·min^{0.5});
 C ——吸附剂周围边界对吸附过程的影响, C 越大,边界层对吸附的影响越大。

根据试验数据计算 q_t 值,以 $t^{0.5}$ 为横坐标、 q_t 值为纵坐标作图,并对数据点进行线性拟合,结果如图 7 所示。

图 5~7 中,由拟合出的直线斜率与截距得出的动力学参数值、相关系数 R^2 见表 1。

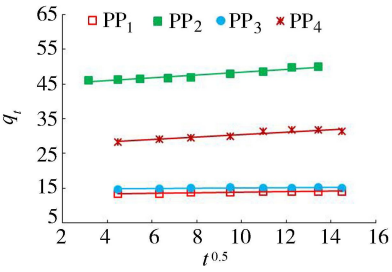


图 7 4 种活性炭吸附亚甲基蓝的内扩散动力学曲线
Fig.7 Internal diffusion kinetic curve of methylene blue adsorption on four kinds of activated carbon

表 1 4 种活性炭剂对亚甲基蓝的吸附动力学模型参数

活性炭	准一级动力学方程			准二级动力学方程			颗粒内扩散方程		
	k_1/min	$q_e/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	R^2	$k_2/(\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$	$q_e/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	R^2	$k_p/(\text{g} \cdot \text{min}^{-0.5})$	$C/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	R^2
PP ₁	0.003 0	0.481 9	0.720 2	0.045 1	14.190 4	0.999 9	0.075 4	13.110 5	0.828 0
PP ₂	0.005 9	2.026 7	0.945 5	0.005 0	50.813 0	0.999 3	0.409 5	44.296 7	0.923 1
PP ₃	0.002 6	0.273 2	0.520 5	0.107 1	15.202 2	0.999 9	0.040 1	14.651 3	0.659 5
PP ₄	0.014 2	0.778 8	0.778 0	0.007 6	32.226 9	0.999 3	0.358 8	26.869 8	0.880 8

从表 1 可以看出,采用准二级动力学模型时,方程的拟合程度最高,4 种活性炭对应的 R^2 分别为 0.999 9、0.999 3、0.999 9 和 0.999 3,说明活性炭吸附亚甲基蓝的过程符合准二级动力学模型,其 k_2 分别为 0.045 1 g/(mg·min)、0.005 0 g/(mg·min)、0.107 1 g/(mg·min) 和 0.0076 g/(mg·min)。

2.6 红外光谱分析结果

4 种活性炭的红外图谱如图 8 所示。由图 8 可知,活性炭 PP₁ 和 PP₃ 的红外图谱相似,两者都在 1 400 cm⁻¹ 处出现了较长的吸收峰;活性炭 PP₂ 在 3 424 cm⁻¹、1 636 cm⁻¹、1 419 cm⁻¹、1 055 cm⁻¹ 处出现吸收峰,活

性炭 PP₄在 3421 cm⁻¹、1636 cm⁻¹、1419 cm⁻¹、1062 cm⁻¹出现吸收峰。区间 3750 ~ 3000 cm⁻¹是不饱和碳(三键和双键、苯环)上 C-H 的伸缩振动区,在区间 1690 ~ 1500 cm⁻¹是主要包括 C=C、C=N、N=N、N=O 等的双键伸缩振动区及苯环的骨架振动区。可以看出,未改性柚子皮制备的活性炭及硫化钠改性后制备的活性炭官能团较为单一,相对而言,氯化铝改性和氢氧化钾改性后制备的活性炭有较多的官能团,这与吸附试验的分析结果是相对应的(PP₂和 PP₄所对应亚甲基蓝溶液的最佳初始质量浓度较高,活性炭的平衡吸附量也较大)。

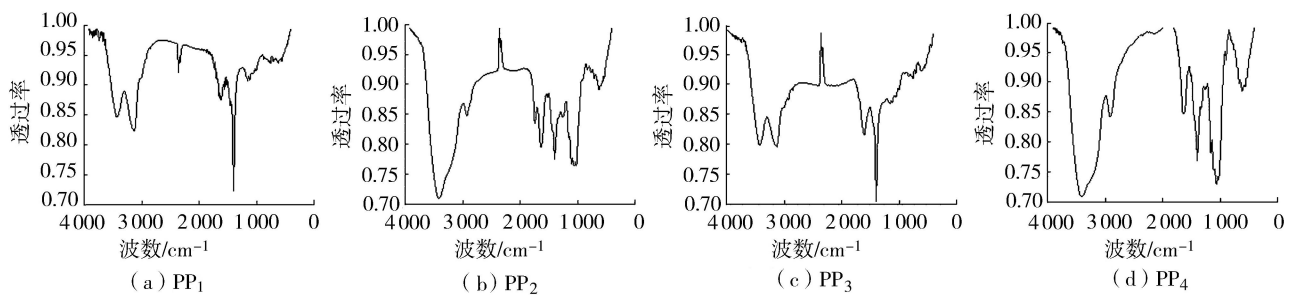


图 8 4 种活性炭的红外图谱

Fig. 8 Infrared spectra of four kinds of activated carbon

3 结 论

- a. 氯化铝改性柚子皮制备的活性炭(PP₂)对应的亚甲基蓝废水最佳初始质量浓度最高(200 mg/L);对于 50 mL 的亚甲基蓝溶液,4 种活性炭的最佳投加量为 0.150 ~ 0.175 g;溶液 pH 值对活性炭 PP₂处理亚甲基蓝废水的影响较大,当 pH 值为 11 时,溶液脱色率最大;活性炭对应的最佳吸附时间为 90 ~ 150 min。综合试验数据可以看出,在最佳条件下,氯化铝改性和氢氧化钾改性柚子皮制备的活性炭平衡吸附量较大,分别为 50 mg/g 和 31 mg/g,与未改性柚子皮制备的活性炭相比,吸附能力明显提高。
- b. 吸附动力学分析得出,4 种活性炭吸附亚甲基蓝的过程均符合准二级动力学模型。
- c. 红外光谱分析结果表明,未改性柚子皮及硫化钠改性后制备的活性炭官能团较为单一,相对而言,氯化铝改性和氢氧化钾改性柚子皮制备的活性炭含有较多的官能团,这与吸附试验的分析结果相对应。

参考文献:

[1] SANGHI R,BHATTACHARYA B. Review on decolorisation of aqueous dye solutions by low cost adsorbents[J]. Coloration Technology,2002,118(5):256-269.

[2] CRINI G. Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal;a review[J]. Bioresource Technology,2006,97:1061-1085.

[3] 韩剑宏,郭金越,张连科,等. 生物炭/铁酸锰对 Zn²⁺ 和 Cu²⁺ 的吸附性能试验[J]. 水资源保护,2020,36(2):59-64. (HAN Jianhong,GUO Jinyue,ZHANG Lianke, et al. Adsorption test of biochar-MnFe₂ O₄ to Zn²⁺ and Cu²⁺ [J]. Water Resources Protection,2020,36(2):59-64. (in Chinese))

[4] 邓天天,李晗晟,徐赵高龙,等. 载镧改性凹凸棒土对水中 As(Ⅲ)的吸附特性[J]. 水资源保护,2020,36(5):104-112. (DENG Tiantian,LI Hansheng,XU Zhaogaolong, et al. Adsorption properties of lanthanum modified attapulgite on As(Ⅲ) in water[J]. Water Resources Protection,2020,36(5):104-112. (in Chinese))

[5] 王有丽,孙文寿,孙文静. 盐酸改性浒苔对 Cr(Ⅵ)的吸附性能研究[J]. 水资源保护,2019,35(5):108-113. (WANG Youli, SUN Wenshou,SUN Wenjing. Adsorption of Cr(Ⅵ) by hydrochloric acid modified Enteromorpha prolifera[J]. Water Resources Protection,2019,35(5):108-113. (in Chinese))

[6] 周殷,胡长伟,李建龙. 柚子皮吸附水溶液中亚甲基蓝的机理研究[J]. 环境科学研究,2008,21(5):49-54. (ZHOU Yin,HU Changwei,LI Jianlong. Study on the biosorption mechanism of methylene blue in aqueous solution using pomelo peel[J]. Research of Environmental Sciences,2008,21(5):49-54. (in Chinese))

[7] 常兰,向容瑶,张梅. 柚子皮活性炭对铀的吸附性能研究[J]. 四川环境,2020,39(5):119-123. (CHANG Lan,XIANG Rongyao,ZHANG Mei. Study on adsorption properties of active carbon from grapefruit peel for uranium [J]. Sichuan Environment,2020,39(5):119-123. (in Chinese))

[8] 陈莹,赵晓光. FeCl₃ 改性柚子皮对亚甲基蓝的吸附性能[J]. 印染助剂,2020,37(2):42-47. (CHEN Ying,ZHAO

Xiaoguang. Adsorption properties of pomelo peel modified with FeCl_3 to methylene blue[J]. Textile Auxiliaries,2020,37(2):42-47. (in Chinese))

[9] 何昭菊,陆燕勤,张华,等. 柚子皮活性炭对刚果红吸附性能试验[J]. 桂林理工大学学报,2015,35(1):147-151. (HE Zhaoju,LU Yanqin,ZHANG Hua,et al. Congo red adsorption from wastewater by activated carbon of pomelo peel[J]. Journal of Guilin University of Technology,2015,35(1):147-151. (in Chinese))

[10] 吴桂萍,吕琳,崔龙哲. 柚子皮对亚甲基蓝吸附性能的研究[J]. 中南民族大学学报(自然科学版),2014,33(3):13-16. (WU Guiping,LYU Lin,CUI Longzhe. Adsorption properties of pomelo peel on methylene blue[J]. Journal of South-Central University for Nationalities(Nature Science Edition),2014,33(3):13-16. (in Chinese))

[11] 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. (WANG Qiong,HUANG Liyuan,GU Huangling,et al. Application of pomelo peel as a potential adsorbent in wastewater treatment[J]. Journal of Hunan University of Technology,2019,33(6):89-94. (in Chinese))

[12] 韩承辉,谢伟芳,阮小燕,等. 柚子皮基活性炭对水溶液中 $\text{Cu}(\text{II})$ 的吸附及机制研究[J]. 有色金属(冶炼部分),2019(12):84-91. (HAN Chenghui,XIE Weifang,RUAN Xiaoyan,et al. Study on adsorption $\text{Cu}(\text{II})$ from aqueous solutions with pomelo peel-based on activated carbon and its adsorption mechanism[J]. Non-Ferrous Metal (Smelting Section),2019(12):84-91. (in Chinese))

[13] 刘立华,刘爽,沈玉龙,等. 改性柚子皮对镉离子的吸附及动力学研究[J]. 南开大学学报(自然科学版),2020,53(2):38-44. (LIU Lihua,LIU Shuang,SHEN Yulong,et al. Study on adsorption and kinetics of cadmium ion on modified grapefruit peel [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis,2020,53(2):38-44. (in Chinese))

[14] 高秀红,刘子明,王思邯,等. 磷酸改性柚子皮对水中 $\text{Cr}(\text{VI})$ 的吸附性能研究[J]. 应用化工,2019,48(12):2881-2885. (GAO Xiuhong,LIU Ziming,WANG Sihan,et al. Adsorption of hexavalent chromium on pomelo peel by modified with phosphoric acid[J]. Applied Chemical Industry,2019,48(12):2881-2885. (in Chinese))

[15] 付钰宸. 改性柚子皮对模拟废水中 Cd^{2+} 的吸附特性研究[J]. 科学技术创新,2019(34):58-59. (FU Yuchen. Adsorption characteristics of Cd^{2+} in simulated wastewater by modified pomelo peel[J]. Scientific and Technological Innovation,2019(34):58-59. (in Chinese))

[16] 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 $\text{Fe}(\text{III})$ -modified pomelo peel on wastewater containing $\text{Cr}(\text{VI})$ [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2017,48(9):2271-2278. (in Chinese))

[17] 梁俊倩,吴锦华,李平,等. 柚子皮吸附活性艳蓝 KN-R 和活性艳橙 X-GN 性能研究[J]. 水处理技术,2011,37(4):88-90. (LIANG Junqian,WU Jinhua,LI Ping,et al. Removal of active brilliant blue (KN-R) and active orange (X-GN) from wastewater using shaddock peel as a low-cost adsorbent [J]. Technology of Water Treatment,2011,37(4):88-90. (in Chinese))

[18] WANG Qiong,ZHOU Cong,KUANG Yinjie,et al. Removal of hexavalent chromium in aquatic solutions by pomelo peel[J]. Water Science and Engineering, 2020,13(1):65-73.

[19] 朱敏聪,黄明强,黄雨晴,等. 柚子皮活性炭对阳离子染料吸附性能的研究[J]. 现代农业科技,2018(22):181-183. (ZHU Mincong,HUANG Mingqiang,HUANG Yuqing,et al. Study on adsorption properties of activated carbons prepared by pomelo peel for cationic dye[J]. Modern Agricultural Science and Technology,2018(22):181-183. (in Chinese))

[20] 陆蓉,田娟,何莹莹,等. 不同改性活性炭吸附苯酚和亚甲基蓝的实验研究[J]. 环境保护科学,2015,41(6):50-53. (LU Rong,TIAN Juan,HE Yingying,et al. Experimental study of absorption of phenol and methylene blue with different modified activated carbons[J]. Environmental Protection Science,2015,41(6):50-53. (in Chinese))

[21] 陈平,徐金霞,冯伟,等. 聚羧酸减水剂对水泥浆结合氯离子性能的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(1):48-54. (CHEN Ping,XU Jinxia,FENG Wei,et al. Influence of polycarboxylate superplasticizer on the chloride binding in cement paste[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2019,47(1):48-54. (in Chinese))

(收稿日期:2020-12-23 编辑:胡新宇)