

DOI: 10.19333/j.mfkj.2017090030806

辣椒秸秆对刚果红染料的吸附性质

淡玄玄 李小敏

(伊犁师范学院 化学与环境科学学院 新疆 伊宁 835000)

摘要:以辣椒秸秆为原料制备生物吸附剂,研究辣椒秸秆吸附剂对染料刚果红(CR)的吸附性质。研究了改性和吸附条件对吸附效果的影响,并拟合其吸附热力学、动力学和等温线模型。正交试验极差分析表明:吸附效果影响因素的主次顺序为,吸附剂用量>初始染料浓度>吸附温度>吸附时间。最佳工艺为:辣椒秸秆1.20g,CR质量浓度300mg/L,吸附温度70℃、时间240min。拟合得出吸附符合准二级反应动力学模型,属于化学吸附;符合Langmuir吸附等温式,可初步判断吸附发生在辣椒秸秆的外表面,属于单分子层化学吸附。热力学计算表明,该吸附过程属于自发的吸热反应。

关键词:刚果红;染料;吸附;辣椒秸秆;正交试验

中图分类号:TS193 文献标志码:A

Adsorption of Congo red by the pepper stalk waste

DAN Xuanxuan, LI Xiaomin

(College of Chemical & Environmental Science, Yili Normal University, Yining, Xinjiang 835000, China)

Abstract: The pepper stalk was used as raw material to prepare the biological adsorbent for the Congo red dye solution adsorption. The effects of the modification and adsorption conditions on adsorption efficiency were studied, and the adsorption thermodynamics, adsorption kinetics and adsorption isotherm model were established. The orthogonal experiment analysis indicated that the influence from high to low follows adsorbent dosage, initial dye concentration, adsorption temperature and time. The results showed that the optimized process: adsorption temperature was 70℃, adsorption time was 240 min, the initial dye concentration was 300 mg/L and the adsorbent dosage was 1.20g. By fitting the adsorption kinetics, the adsorption process was according with the quasi-two-order reaction kinetic model, which was controlled by chemical adsorption. The fit of the adsorption isotherm model conformed to the Langmuir adsorption isotherm, and the adsorption processes belong to monolayer adsorption. The thermodynamic calculations showed that the adsorption process was endothermic spontaneous reaction

Keywords: Congo red; dye; adsorption; pepper stalk; orthogonal experiment

纺织印染业每年产生大量的印染废水^[1-2],如何解决废水污染问题已成为一个难点。在废水处理方面,研究者提出了很多方法^[3],也取得了一定的进展,如生物质吸附染料离子^[4-5]、制备活性炭吸附染料等^[6-9]。研究吸附法应用于染料废水处理时,需考虑以下几方面^[10]:首先,最早使用的吸

附材料其吸附效果并不是非常理想,需要不断发现大量的新型原材料^[11],其具有成本低、吸附效率高、可再生等特点;其次,废水处理必须从源头着手,生产过程中,降低有机物质^[12]和含毒物质^[13]的使用。

全世界辣椒产量每年可达 $3\ 700 \times 10^4$ t,其中我国和印度产量分别位于第1、2位^[14-15]。我国辣椒产量巨大,辣椒深加工产品时,秸秆以废料形式丢弃,如果对其加以利用,可以实现资源化利用,还可以带来一定的经济效益。毛宇等^[16]对辣椒秸秆进行加工,制备高比表面积活性炭,研究其对染料的吸附效果。

收稿日期:2017-09-04

基金项目:新疆维吾尔自治区青年科技创新人才培养工程(优秀青年科技人才培养项目QN2016YX0066)

第一作者简介:淡玄玄,硕士生,主要研究方向为环境分析及治理。通信作者:李小敏, E-mail: Lixm@163.com。

本文以辣椒秸秆为原料,直接作为吸附剂,研究其对刚果红染料的吸附性能。用氢氧化钠对其进行碱法处理,探讨吸附温度、时间、吸附剂用量和初始染料浓度对吸附效果的影响,并对其进行动力学和热力学拟合,研究其吸附机制。对辣椒秸秆进行综合利用,具有重要的现实意义,开发系列辣椒副产物产品的市场前景广阔。

1 实验部分

1.1 实验材料及仪器

辣椒秸秆,取自于新疆吐鲁番市火焰山万亩西甜瓜基地某辣椒种植户。主要试剂:刚果红(西安化学试剂厂);氢氧化钠(天津市大茂化学试剂厂)。主要仪器:IR Presting-21型FT-IR光谱仪(美国Thermo Ni公司);SHZ-III型循环水真空泵(上海亚荣生化仪器厂);723PC型可见分光光度计(上海菁华科技仪器有限公司);SHA-BA型水浴恒温振荡器(常州亚特实验仪器有限公司);FA2204B型电子天平(上海天美天平仪器有限公司);DF-401S型集热式磁力加热搅拌器(金坛市医疗仪器厂);TDZ5-WS型台式低速离心机(长沙湘仪离心机仪器有限公司);BAO-450A型精密鼓风干燥箱(施都凯仪器设备(上海)有限公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 辣椒秸秆预处理

将去除根、叶、果实的辣椒秸秆在当地气候条件下自然风干,用粉碎机粉碎。先用0.20 mm(80目)的标准筛进行初次筛分,保留小于80目的辣椒秸秆,接着用0.15 mm(100目)的标准筛将其再次筛分,最后保留0.15~0.20 mm(80~100目)之间的辣椒秸秆,装袋备用。

1.2.2 测定及计算方法

以蒸馏水为空白参照,利用可见分光光度计进行全波扫描(200~800 nm),得出最大波长498 nm。配制质量浓度分别为4、8、12、16、20 mg/L的刚果红溶液,在498 nm波长下检测,并绘制标准曲线。采用式(1)、(2)分别计算吸附完成后吸附量和去除率,以此分析吸附剂的吸附效果。

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

$$q_e = \frac{\rho_0 - \rho_e}{W} V \quad (2)$$

式中: E 为刚果红去除率,%; ρ_0 为刚果红的初始质量浓度,mg/L; q_e 为吸附剂吸附量,mg/g; ρ_e 为刚果红平衡浓度,mg/L; V 为刚果红溶液体积,L; W 为辣椒秸秆质量,g。

1.2.3 吸附效果及表征

采用批量静态实验,50 mL的锥形瓶中加入25 mL一定质量浓度的刚果红溶液,再加入一定量吸附剂,振荡吸附,后取上清液离心后测其吸光度,计算吸附容量和去除率。

在4000~400 cm^{-1} 范围内,以波数为横坐标,以透光度为纵坐标做辣椒秸秆的红外光谱图并进行分析形成。

2 实验结果与分析

2.1 改性剂的影响

将不同浓度氢氧化钠溶液(0.10、0.20、0.50、0.80、1.00 mol/L)改性后的5种辣椒秸秆分别置于5个50 mL的带塞锥形瓶中,编号1~5。称取0.30 g未改性的辣椒秸秆置于50 mL的带塞锥形瓶,编号6。分别向6个锥形瓶中加入25 mL 80 mol/L的刚果红溶液,在水浴恒温25 $^{\circ}\text{C}$ 、转速170 r/min的条件下往复振荡1 h。吸附结束后离心5 min,取上清液用分光光度计测定吸附后刚果红的吸光度 A ,计算染料的去除率和吸附量。氢氧化钠改性辣椒秸秆对刚果红的吸附影响见图1。由图可知,当氢氧化钠浓度由0.10 mol/L增至1.00 mol/L时,改性后的辣椒秸秆对刚果红的去除率效果保持水平趋势基本不变,去除率在37.83%~38.04%的较小范围内,而未用氢氧化钠改性的辣椒秸秆其吸附效果最好。由此可见,在此实验中未改性的辣椒秸秆可选作为最佳的吸附剂,此时去除率为65.26%,吸附量为4.35 mg/g。所以后续实验皆直接选用未改性的辣椒秸秆。

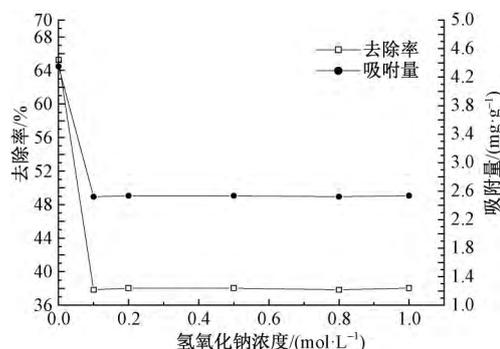


图1 氢氧化钠改性辣椒秸秆对刚果红的吸附影响

2.2 单因素吸附条件对吸附性能的影响

2.2.1 摇床温度的影响

取0.30 g辣椒秸秆加入25 mL 80 mol/L的刚果红溶液,分别在20、30、40、50、60、70、80 $^{\circ}\text{C}$ 条件下水浴恒温振荡1 h,吸附结束后取上清液离心后测定溶液的吸光度并计算吸附量和去除率,结果如图2所

示。由图可知:温度由20℃升至70℃时,去除率由87.63%上升至95.90%,此时吸附量为6.39 mg/g,辣椒秸秆对刚果红具有一定的吸附能力,且吸附效果良好。温度继续升高,刚果红去除率和吸附量均下降,可能是随着温度升高刚果红分子在吸附剂表面运动加速,分子碰撞加剧,不利于表面吸附。综合考虑,后续实验皆在70℃条件下进行。

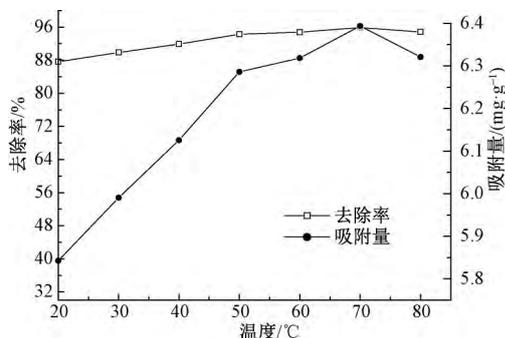


图2 摇床温度对辣椒秸秆吸附性能的影响

2.2.2 吸附时间的影响

称取0.30 g辣椒秸秆加入25 mL 80 mg/L的刚果红溶液,在70℃条件下分别水浴恒温振荡10、30、60、120、240、360、600 min,吸附结束后取上清液离心后测定溶液的吸光度,并计算吸附量和去除率,其结果见图3。由图可知,辣椒秸秆对刚果红的吸附较快,在吸附初始30 min内,去除率速增,120 min后变化趋势平缓,在360 min后吸附趋于平衡,而在240 min时有最大去除率和吸附量,去除率为97.76%,吸附量为6.52 mg/g。因此,确定后续实验中最佳吸附时间为240 min。

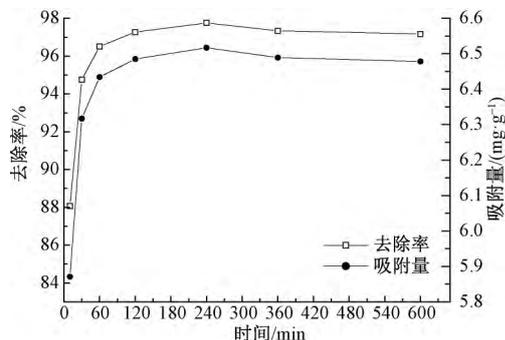


图3 吸附时间对辣椒秸秆吸附性能的影响

2.2.3 初始染料质量浓度的影响

取0.30 g辣椒秸秆置于锥形瓶中,分别加入盛有25 mL的不同质量浓度(30、50、100、200、300、400 mg/L)刚果红溶液,在70℃条件下水浴恒温振荡240 min,取上清液离心后测定溶液吸光度,并计算去除率和吸附量,其结果如图4所示。由图可得知,质量浓度范围30~400 mg/L,去除率缓慢下降,从97.83%下降到88.89%,这可能是辣椒秸秆吸附

剂对刚果红质量浓度的变化有较强的适应能力。同时辣椒秸秆的吸附量随着初始质量浓度的增大而增大,从2.41 mg/g增大到29.63 mg/g,这可能是因为刚果红质量浓度增大,围绕在辣椒秸秆周围的刚果红分子相应增加使吸附进行的更加充分。因此,综合考虑辣椒秸秆对刚果红的去除率和吸附量,实验选择刚果红的初始质量浓度为300 mg/L。

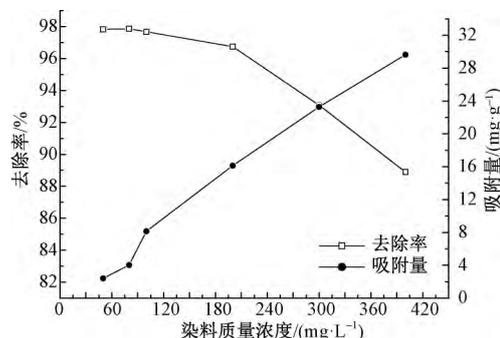


图4 不同初始染料质量浓度对辣椒秸秆吸附性能的影响

2.2.4 辣椒吸附剂用量的影响

向7个盛有25 mL质量浓度为300 mg/L刚果红溶液的50 mL锥形瓶中分别加入辣椒秸秆0.10、0.30、0.50、0.70、0.90、1.20和1.50 g。在70℃下水浴恒温振荡240 min,吸附结束后取上清液离心后测其吸光度,并计算去除率和吸附量,结果如图5所示。由图可得,随着吸附剂用量逐渐增加,其吸附量逐渐减少,去除率逐渐增加。当辣椒秸秆用量在0.10~0.50 g范围内去除率呈明显上升趋势,辣椒秸秆用量在0.50 g之后去除率增加趋于水平,增幅并不明显,其原因可能是在静态下,固液接触面对吸附效果有一定影响。

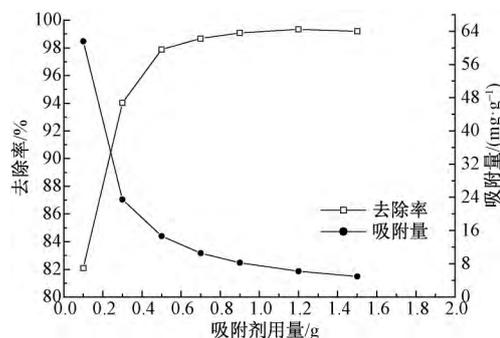


图5 不同辣椒秸秆吸附剂用量对吸附性能的影响

吸附剂用量较小时,溶液体积一定,固液接触面积较多;随着用量继续增加,溶液体积一定,固液接触面积逐渐减少,导致去除率增加趋缓,单位质量吸附剂吸附的刚果红质量降低。辣椒秸秆用量从0.10 g增加到1.50 g时,去除率从82.09%上升到99.34%,吸附量从61.56 mg/g降低到4.96 mg/g。综合考虑,选取1.20 g作为后续实验吸附剂用量。

2.3 交互因素的影响

在单因素实验的基础上,采用正交试验设计方法探索影响因子之间的相互影响,选取影响实验结果明显的几种因素,正交试验设计见表1,正交试验结果见表2,直观分析结果见表3。由表3可知,根据各指标不同水平平均值大小确定各因素的优化组合为吸附剂用量 0.10 g、刚果红初始质量浓度 500 mg/L、吸附温度 50 ℃、吸附时间 120 min,此时可获得最大吸附量。根据极差(R_a)大小确定各指标下的因素主次顺序:吸附剂用量 > 刚果红初始质量浓度 > 吸附温度 > 吸附时间。根据各指标不同水平平均值大小确定各因素的优化组合为吸附剂用量 1.20 g、吸附温度 50 ℃、吸附时间 120 min、刚果红初始质量浓度 500 mg/L,此时可获得最大去除率。根据极差 R_b 大小确定各指标下的因素主次顺序:吸附剂用量 > 吸附温度 > 吸附时间 > 刚果红初始质量浓度。

表1 正交试验设计

水平	摇床温度 A/℃	吸附时间 B/min	刚果红初始质量 浓度 C/(mg·L ⁻¹)	吸附剂用量 D/g
1	30	60	100	0.10
2	50	120	300	0.60
3	70	240	500	1.20

表2 正交试验结果

试验号	A/℃	B/min	C/ (mg·L ⁻¹)	D/g	吸附量 q/ (mg·L ⁻¹)	去除率 E/%
1	30	60	100	0.10	14.44	57.77
2	30	120	300	0.60	11.55	92.43
3	30	240	500	1.20	9.80	94.12
4	50	60	300	1.20	6.17	98.67
5	50	120	500	0.10	111.50	89.20
6	50	240	100	0.60	4.05	97.19
7	70	60	500	0.60	19.89	95.49
8	70	120	100	1.20	2.05	98.22
9	70	240	300	0.10	61.93	82.58

表3 正交试验直观分析

项目	A	B	C	D	项目	A	B	C	D
T_{1a}	35.79	40.50	20.54	187.87	K_{1a}	11.930	13.500	6.847	62.623
T_{2a}	121.72	125.10	79.65	35.49	K_{2a}	40.573	41.700	26.550	11.830
T_{3a}	83.87	75.78	141.06	18.02	K_{3a}	27.957	25.260	47.063	6.007
					R_a	28.643	28.200	40.216	56.616
T_{1b}	244.32	251.93	253.18	229.55	K_{1b}	81.440	83.977	84.393	76.517
T_{2b}	285.06	279.85	273.68	285.11	K_{2b}	95.020	93.283	91.227	95.037
T_{3b}	276.29	273.89	278.81	291.01	K_{3b}	92.097	91.297	92.937	97.003
					R_b	13.580	9.306	8.544	20.486

注: T_i 为单因素吸附量之和; K_i 为单因素吸附量平均值; R 为最大平均值和最小平均值之差; a 为吸附量分析; b 为去除率分析。

2.4 动力学方程和热力学参数分析

2.4.1 热力学参数分析

2.4.1.1 焓 ΔH 的计算

热力学研究可以了解吸附进行的程度和是否为自发的或外界增加驱动力吸附^[17],也可以更进一步分析各种参数对吸附效果影响的原因。吸附焓 ΔH 由 Clausis-Clapeyron 方程计算。

$$\ln p_e = \Delta H/RT + K \quad (3)$$

式中: T 为热力学温度, K; R 为理想气体常数, J/(mol·K); ΔH 为等量吸附焓, kJ/mol; K 为常数。

通过测定不同温度下辣椒秸秆对刚果红的吸附,做出吸附等量线,得出线性拟合方程为 $\ln p_e = 9.12346/T + 0.00229$, $R^2 = 0.93781$ 。由相关系数可知,该吸附过程符合 Clausis-Clapeyron 方程。由式(3)和线性方程联合计算,可得 $K = 0.00229$, $\Delta H = 7.5852 \times 10^{-2}$ kJ/mol, $\Delta H > 0$, 该吸附过程为吸热过程。对此也能进一步验证上述实验

结果的正确性。随着温度的上升,吸附量和去除率也随着增大,因为在一定的温度范围内吸热过程升高温度有助于反应进行。

2.4.1.2 吸附吉布斯自由能 ΔG 和吸附熵 ΔS 的计算

ΔG 、 ΔS 的计算公式如下:

$$\Delta G = -nRT \quad (4)$$

$$\Delta S = \frac{\Delta H - \Delta G}{T} \quad (5)$$

式中: ΔG 为吸附自由能, kJ/mol; n 为 Freundlich 系数; ΔS 为吸附熵变, J/(mol·K)。

根据上式分别计算得 $\Delta G = -5.5323$ kJ/mol, $\Delta G < 0$; $\Delta S = 16.3503$ J/(mol·K), $\Delta S > 0$ 。由计算结果可知 $\Delta G < 0$, 这说明辣椒秸秆吸附剂对刚果红染料的吸附过程是自发进行的。熵变 ΔS 反映体系内部存在状态的混乱程度。 ΔS 为正值,这说明在染料吸附过程中,固液界面的混乱程度增加,熵

增过程。

2.4.2 动力学吸附模型

动力学吸附常准一阶和准二阶模型和离子内扩散方程进行动力学机制特征分析^[17]。

准一级反应动力学模型:

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

准二级反应动力学行为:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (7)$$

粒子内扩散方程:

$$q_t = k_1 t^{1/2} + C \quad (8)$$

式中: k_1 为准一级吸附速率常数 min^{-1} ; k_2 为准二级吸附速率常数 $\text{g}/(\text{mg} \cdot \text{min})$; k_1 为颗粒内扩散速率常数 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1/2}$; q_t 为 t 时刻的刚果红吸附量 mg/g ; C 为与边界层厚度有关的常数 mg/g 。

由准一阶和准二阶动力学方程拟合所得到的参数如表4所示。根据准一级动力学和准二级动力学方程拟合参数进行分析,其 q_e 的拟合值(6.49 mg/g)与实验值(6.52 mg/g)基本吻合,根据相关性比较可知准二级动力学方程 $R^2 = 0.9999$,则该吸附过程描述与准二级动力学方程较一致,属于化学吸附。

表4 动力学拟合参数

准一级动力学方程			准二级动力学方程		
实验值(q_e)	K_1	R^2	拟合值(q_e)	K_2	R^2
6.52	0.046	0.974 0	6.49	0.393	0.999 9

以 q_t 对 $t^{1/2}$ 作图,如图6所示。 q_t 对 $t^{1/2}$ 作图时,曲线不通过原点, C 不为0。则说明颗粒内扩散不是唯一控制吸附过程,还有膜扩散影响。

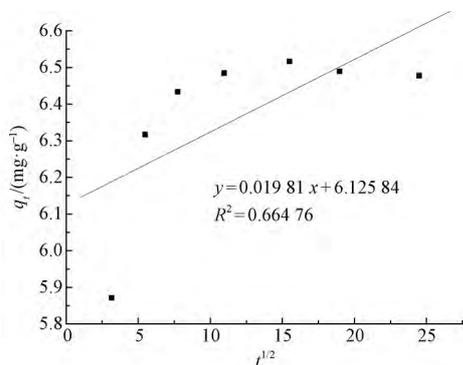


图6 粒子内扩散方程拟合图

2.4.3 等温线性吸附模型

辣椒秸秆对刚果红染料的吸附等温线模型^[18]见式(9)。对吸附数据进行线性拟合,并得到有关参数如表5所示。

Langmuir 吸附模型表达式:

$$\frac{\rho_e}{q_e} = \frac{1}{k_L q_m} + \frac{\rho_e}{q_m} \quad (9)$$

Freundlich 吸附模型表达式:

$$\ln q_e \ln k_F + \frac{1}{n} \ln \rho_e \quad (10)$$

式中: k_L 为 Langmuir 平衡常数 L/g ; q_m 为吸附剂的最大吸附量 mg/g ; n 为强度系数; k_F 为 Freundlich 平衡常数 L/g 。

表5 Langmuir 和 Freundlich 模型相关参数

Langmuir 等温式			Freundlich 等温式		
$q_m /$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	$k_L /$ ($\text{L} \cdot \text{g}^{-1}$)	R^2	$k_F /$ ($\text{L} \cdot \text{g}^{-1}$)	n	R^2
34.29	0.128	0.998 17	4.838	1.94	0.978 32

由表5可知,由于 Langmuir 等温式的 R^2 大于 Freundlich 等温式的 R^2 ,因此辣椒秸秆对刚果红的吸附等温线采用 Langmuir 吸附等温式拟合效果更好,可以初步判断吸附值发生在辣椒秸秆的外表面,辣椒秸秆对刚果红的吸附属于单分子层化学吸附。对 Langmuir 模型和 Freundlich 模型的拟合方程 R^2 进行比较,二者相差不大,且 $1/n = 0.515 07$,这说明吸附还是比较容易进行的,则进一步证明辣椒秸秆用于吸附刚果红染液具有可行性。

2.5 表征分析

图7为辣椒秸秆原料和吸附染料后辣椒秸秆的红外光谱图。木质素和纤维素的特征官能团吸收峰主要集中在 $1800 \sim 800 \text{ cm}^{-1}$ 指纹区。

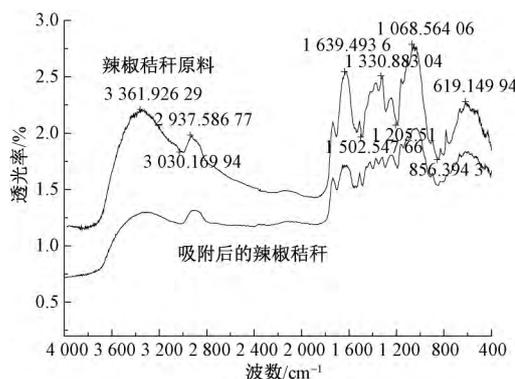


图7 辣椒秸秆红外光谱图

由图7可知,辣椒秸秆在 856 cm^{-1} 为对位取代苯的吸收峰, 3030 cm^{-1} 的峰为 C—H 伸缩振动, —CH₂—上的 C—H 键的弯曲振动峰出现在 1502 cm^{-1} 处, 1330 cm^{-1} 为烷烃 C—H 键的弯曲振动峰, —OH 的弯曲特征峰出现在 856 cm^{-1} 处, $1500 \sim 1250 \text{ cm}^{-1}$ 为 O—H 键伸缩振动, 1205 cm^{-1} 处的峰为 C—C 伸缩振动, 3030 cm^{-1} 处的峰为 =C—H 键, $2000 \sim 1500 \text{ cm}^{-1}$ 处为 —C=C— 双键振动区, $1650 \sim 1550 \text{ cm}^{-1}$ 为仲胺类 N—H 弯曲振动, 1068 cm^{-1} 为 C—N 伸缩振动。透光度 T 表示吸收强度,透光度减小,表明吸收的越好。并且吸附染

料后辣椒秸秆各处峰高降低,峰面积减小,说明辣椒秸秆起到了一定的吸附效果。

3 结 论

通过辣椒秸秆吸附剂吸附刚果红的实验研究,并对上述各实验结果的进行讨论与分析可得以下结论:

①未改性的辣椒秸秆可以直接作为吸附剂对刚果红溶液进行吸附,并能获得较好的吸附效果。

②通过考察不同摇床温度的影响,得出最佳的吸附温度为 70 ℃。后进行热力学计算得出吸附焓 $\Delta H > 0$,熵 $\Delta S > 0$,吉布斯自由能 $\Delta G < 0$,则该吸附过程为吸热反应,能够自发进行,升温有助于反应进行。

③通过考察不同吸附时间的影响,得出最佳吸附时间为 240 min。后进行动力学模型研究,通过准一级反应动力学和准二级反应动力学模型拟合发现,辣椒秸秆对刚果红的吸附符合准二级反应动力学模型,因此得出该吸附过程属于化学吸附,受化学吸附机制的控制。

④通过考察不同初始浓度的影响,得出去除率随着刚果红初始质量浓度的增大而减小,而吸附量随着初始质量浓度的增大而增大。综合考虑,刚果红的最佳初始质量浓度为 300 mg/L。

⑤通过 Langmuir 和 Freundlich 吸附等温式拟合发现,辣椒秸秆对刚果红的吸附等温线更符合 Langmuir 吸附等温式,可初步判断吸附值发生在辣椒秸秆的外表面,辣椒秸秆对刚果红的吸附属于单分子层化学吸附。

⑥通过正交试验的直观分析,优化组合为吸附剂用量 0.10 g、刚果红初始质量浓度 500 mg/L、吸附温度 50 ℃、吸附时间 120 min,此时可获得最大吸附量;优化组合为吸附剂用量 1.20 g、吸附温度 50 ℃、吸附时间 120 min、刚果红初始质量浓度 500 mg/L,此时可获得最大去除率。

参考文献:

[1] 王晶晶,解芳,李鑫. 苕麻织物与苕麻/棉混纺织物的防治整理[J]. 毛纺科技,2017,45(8): 36-39.

[2] 崔景东,路丹丹,李静,等. 紫外线辐射对胡麻纤维染色性能的影响[J]. 毛纺科技,2017,45(8): 52-54.

[3] 郭理想,阮海兴,陈伟东. 染料废水处理技术方法的研究[J]. 化工管理,2016(7): 212-213.

[4] 淡玄玄,李小敏,朱振华. 氢氧化钠、L-苹果酸改性亚麻超声波辅助吸附甲基紫研究[J]. 水处理技术,

2016,42(9): 56-61.

- [5] 尚娜,范顺利,胡蓓蓓,等. 磷酸改性玉米芯吸附剂对水中亚甲基蓝的吸附研究[J]. 河南师范大学学报(自然科学版),2016,43(6): 59-64.
- [6] 马留可,詹福如. 活性炭对水中亚甲基蓝的吸附性能研究[J]. 化学工程,2016,44(1): 28-32.
- [7] 刘娟丽,曹天鹏,王黎虹. 秸秆生物质炭的制备及吸附性能研究[J]. 工业安全与环保,2016,42(1): 1-4.
- [8] 马放,周家晖,郭海娟,等. 磁性活性炭的制备及其吸附性能[J]. 哈尔滨工业大学学报,2016,48(2): 50-56.
- [9] ZHANG Chong, FANG Zhenhua, YANG Ling. Research on preparation and absorption capacity of walnut shell-based activated carbon [J]. Chemical Engineer, 2016, 255(12): 66-68.
- [10] 尹乐斌,雷志明,杨莹,等. 辣椒加工副产物的综合利用现状[J]. 农产品加工,2016(11): 59-61.
- [11] 严岩,丁桑岚. 吸附法净化印染废水刚果红与亚甲基蓝研究进展[J]. 四川化工,2017,20(2): 22-25.
- [12] MARIA Luisa Soto, ANDRES Moure, HERMINIA Dominguez, et al. Recovery, concentration and purification of phenolic compounds by adsorption: A review [J]. Journal of Food Engineering, 2011, 105: 1-27.
- [13] 陈莉,司慧,靳峰,等. 改性甘薯渣对亚甲基蓝的吸附特性及吸附机制[J]. 环境工程学报,2016,12(7): 4277-4283.
- [14] ZHU Wenjie, WANG Jingxuan, WU Di, et al. Investigating the heavy metal adsorption of mesoporous silica materials prepared by microwave synthesis [J]. Nanoscale Research Letters, 2017(12): 232-323.
- [15] 毕金华,陈广银,陈乐,等. 辣椒秸秆不同部位化学组分及厌氧发酵产沼气潜力[J]. 中国环境科学,2016(7): 2073-2078.
- [16] 毛宇,马承愚,范艺苑,等. 废弃辣椒秸秆高比表面积活性炭的制备及表征[J]. 应用化工,2012(5): 766-770.
- [17] MEBRAHTOM Gebresematia, NIGUS Gabbiye, OMPRAKASH Sahub. Sorption of cyanide from aqueous medium by coffee husk: Response surface methodology [J]. Journal of Applied Research and Technology, 2017, 15: 27-35.
- [18] BADREDDINE Belhamdia, ZOULIKHA Merzougua, MOHAMED Trarib, et al. A kinetic, equilibrium and thermodynamic study of L-phenylalanine adsorption using activated carbon based on agricultural waste (date stones) [J]. Journal of Applied Research and Technology, 2016, 14: 354-366.