

改性国槐叶对亚甲基蓝吸附特性研究

陈 莉^{1,2} 李 新¹ 司丽赞¹ 商晓辉²

(1.运城学院生命科学系,运城 044000;2.韩国又石大学制药与化妆品工学系,完州郡 55338)

摘 要 为考察改性国槐叶加入量及其粒径、亚甲基蓝初始质量浓度、pH、吸附温度、吸附时间对吸附率的影响,进行了单因素试验,对筛选出的显著因素采用二次回归正交旋转优化。在改性国槐叶加入量 1.2g、吸附时间 140min、亚甲基蓝初始质量浓度 250mg/L 条件下,利用 DPS 数据处理系统预测的最大吸附率为 94.62%,最大吸附率实测值为 94.43%,二者吻合。通过吸附等温与吸附动力学分析可知,改性国槐叶对亚甲基蓝的吸附过程是以化学吸附为主的多活性位点吸附,遵循准二级吸附动力学模型。由 F 检验可知,在 1% 极显著水平上改性国槐叶的吸附效果优于其他材料,活性炭次之,大孔吸附树脂 AB-8 较差,硅藻土最差。扫描电子显微镜与 X 射线能谱分析表明,改性国槐叶具有高度疏松褶皱的结构且含 C、O 等元素;傅里叶变换红外光谱分析显示其含—OH、C=C 等基团,利于亚甲基蓝的吸附。改性国槐叶比表面积为 133.053m²/g,为脱除亚甲基蓝提供了相对较多的吸附位点。

关键词 改性国槐叶,亚甲基蓝,吸附特性,吸附机制

Study on adsorption characteristics of methylene blue by preparation of modified sophora japonica leaves

Chen Li^{1,2} Li Xin¹ Si Liyun¹ Shang Xiaohui²

(1.Department of Life Science,Yuncheng University,Yuncheng 044000;2.Department of Cosmetic and Pharmaceutical Engineering,Woosuk University,Wanju 55338,Korea)

Abstract In order to investigate the effect of the adding amount of modified sophora japonica leaves and its particle size,the initial mass concentration of methylene blue,pH,adsorption temperature and adsorption time on the adsorption rate,a single factor experiment was carried out.The quadratic regression orthogonal rotation optimization was used for selecting the significant factors.Under the condition of the addition of 1.2g,the adsorption time of 140min and the initial mass concentration of methylene blue of 250mg/L,the maximum adsorption rate predicted by DPS data processing system was 94.62%,and the maximum adsorption rate was 94.43%.According to the adsorption isothermal and adsorption kinetics analysis,the adsorption process of methylene blue by the leaves was based on chemisorption-based multi-active site adsorption,which followed the quasi-secondary adsorption kinetics model.The F test showed that the adsorption effect of the leaves was superior to other materials at the extremely significant level of 1%,followed by activated carbon,and the macroporous adsorption resin AB-8 was inferior and the diatomaceous earth was the worst.Scanning electron microscopy and X-ray energy spectrum analysis showed that the leaves had a highly loose and wrinkled structure and contained elements such as C and O.Fourier transform infrared spectroscopy analysis showed that it contained groups such as —OH and C=C,which were favorable for the adsorption of methylene blue.The leaves had a specific surface area of 133.053m²/g,which provided relatively more adsorption sites for the removal of methylene blue.

Key words modified sophora japonica leave,methylene blue,adsorption characteristics,adsorption mechanism

印染废水占工业废水 30% 左右^[1-2],它能吸收光线进而影响光合作用^[3-4]导致水体缺氧,对水生生物的生长造成很大危害。同时排放的印染废水中的有毒物质会随着渗透作用进入地下水,最终危害人

类的身体健康^[5-6]。

亚甲基蓝多用于生化染色,也广泛应用于生物医药方面,使用适量亚甲基蓝对一氧化碳轻微中毒者有解毒效果,大剂量注射会使人精神出现问题^[7-8]。

基金项目:山西省社科联 2018 年度重点课题研究项目(SSKLZDKT2018120);山西省“1331”工程重点学科项目(098-091704)

作者简介:陈莉(1980-),女,博士,副教授,研究方向为生物资源高效利用。

目前去除工业废水中印染物质的方法主要有物理法、化学法、生化法及几种工艺联用协同处理^[9-10]。印染废水处理的方法主要有凝聚法、电解法、吸附法以及聚乙烯醇(PVA)处理法等^[11-12]。

北方秋冬季节,大量落叶多被堆积起来进行焚烧,既污染环境又造成PM2.5上升。针对该问题,本研究以国槐落叶为原料,将废弃落叶经过改性处理制备出用于脱除印染废水中亚甲基蓝的新型生物吸附剂^[13-15]并研究了其对亚甲基蓝的吸附性能。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

亚甲基蓝、氢氧化钠均为分析纯;无水乙醇、大孔吸附树脂AB-8、活性炭、硅藻土、蒸馏水。

笔式酸度计(PHS-3BW型),上海般特仪器制造有限公司;可见分光光度计(772N型),上海精密科学仪器有限公司;电热恒温鼓风干燥箱(WGL-65BE型),天津市泰斯特仪器有限公司;数控超声波清洗器(KQ-250DE型),昆山市超声仪器有限公司;数显恒温水浴锅(HH-4型),天津华北实验仪器有限公司;扫描电子显微镜(SEM,S-4800型),日本日立公司;X射线能谱仪(EDS,S-4800型),日本日立公司;傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR,TENSOR 27型),德国布鲁克公司;标准筛(SG280A型),浙江上虞市道墟张兴纱筛厂;比表面及孔径分析仪(BET,NOVA2200e型),美国康塔仪器公司。

1.2 实验过程

1.2.1 改性国槐叶的制备

将收集的国槐落叶在沸水中煮50~70min,取出后漂洗至中性;然后用0.15mol/L氢氧化钠溶液浸泡50~60min,漂洗至中性后用无水乙醇脱色18~24h;再次漂洗处理后于60~80℃干燥,粉碎待用。

1.2.2 分析与测试

采用扫描电子显微镜观察改性国槐叶样品的微观形貌;采用傅里叶变换红外光谱仪分析样品的结构;采用比表面及孔径分布仪测试样品的比表面积及孔径分布;采用X射线能谱仪分析样品中元素含量。

1.2.3 单因素试验

为考察改性国槐叶加入量(0.3g、0.5g、0.7g、0.9g、1.1g、1.3g),改性国槐叶粒径(40目、60目、80目、100目、120目、150目),亚甲基蓝溶液初始质

量浓度(60mg/L、180mg/L、200mg/L、300mg/L、400mg/L、500mg/L),溶液pH(3、4、5、6、7、8、9、10、11),吸附温度(20℃、25℃、30℃、40℃、50℃、60℃)和吸附时间(20min、40min、60min、80min、100min、120min、140min、160min、180min)对亚甲基蓝吸附效果的影响,分别进行单因素试验。

1.2.4 吸附量及吸附率计算

将改性国槐叶加入50mL亚甲基蓝溶液中,在一定温度条件下吸附一定时间,过滤后取滤液,测滤液吸光值。吸附量和吸附率计算方法^[16]如下:

$$q = \frac{(C_0 - C) \times V}{M} \quad (1)$$

$$\text{吸附率}(\%) = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中, q 为吸附量,mg/g; C_0 为亚甲基蓝溶液初始质量浓度,mg/L; C 为吸附后的平衡浓度,mg/L; V 为亚甲基蓝溶液体积,L; M 为改性国槐叶加入质量,g。

1.2.5 二次正交旋转组合设计

在单因素试验基础上,筛选出影响吸附率的3个关键因素:亚甲基蓝初始质量浓度(X_1)、改性国槐叶加入量(X_2)、吸附时间(X_3)。通过计算得到各影响因素的最佳值,设计了因素水平编码表(见表1)。

表1 因素水平编码表

水平 编码值	X_1 :亚甲基蓝初始 质量浓度/(mg·L ⁻¹)	X_2 :改性国槐叶 加入量/g	X_3 :吸附时间/ min
-1.682	250	0.8	100
-1	300	0.9	110
0	350	1.0	120
1	400	1.1	130
1.682	450	1.2	140

注:亚甲基蓝初始质量浓度、改性国槐叶加入量、吸附时间的水平间隔值分别为50、0.1、10。

1.2.6 吸附材料对碱性品红的吸附实验

在5组250mL锥形瓶中分别加入50mL质量浓度分别为200mg/L、250mg/L、300mg/L、350mg/L、400mg/L的碱性品红溶液并标记,接着分别加入改性国槐叶(80目、孔径0.2mm)、活性炭(5~10目、孔径2~4mm)、大孔吸附树脂AB-8(16~60目、孔径0.315~1.25mm)、硅藻土(120~150目、孔径0.1~0.125mm),在加入量1.2g、pH=8、室温条件下静置吸附1h。过滤后得到滤

液,利用可见分光光度计测吸光度,计算每种吸附材料的吸附率。

2 结果与讨论

2.1 BET 分析

BET 分析结果表明,改性国槐叶比表面积为 $133.053\text{m}^2/\text{g}$ 、孔容为 $0.118\text{cm}^3/\text{g}$ 。改性国槐叶的孔径和比表面积较大,为脱除亚甲基蓝提供了相对较多的吸附位点,有利于吸附反应的进行。

2.2 SEM 分析

图 1 为改性前后国槐叶及吸附亚甲基蓝的改性国槐叶 SEM 图。由图可以看出:改性前国槐叶表面空隙较少、较平滑[见图 1(a)];改性后的国槐叶表面空隙相对较大,粗糙多孔且有褶皱[见图 1(b)],为吸附反应提供了活性位点,有利于吸附亚甲基蓝。吸附亚甲基蓝后的改性国槐叶表面较平滑,孔隙减少[见图 1(c)],原因为空隙被亚甲基蓝所填充。由此可见,改性国槐叶对亚甲基蓝有一定的物理吸附作用。

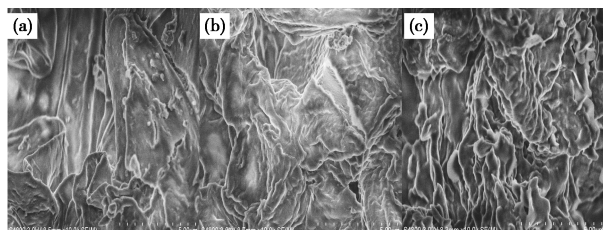


图 1 改性前后国槐叶及吸附亚甲基蓝的改性国槐叶 SEM 图

[(a)改性前;(b)改性后;(c)吸附亚甲基蓝的改性国槐叶]

2.3 EDS 分析

利用 X 射线能谱仪对改性国槐叶的元素组成进行分析(见表 2)。由表可知,改性国槐叶中含有大量 C、O 元素,因此可能存在共轭体系—C—O—、—C=C—等基团。而这些基团的存在将使改性国槐叶具有良好的吸附能力。

表 2 改性国槐叶元素组成及含量

元素	C	O	Na	Mg	Al	S	Ca
含量/%	58.244	39.446	0.197	0.347	0.232	0.384	1.151

注:含量为质量分数。

2.4 FT-IR 表征

改性前后国槐叶及吸附亚甲基蓝的改性国槐叶 FT-IR 谱图见图 2。由改性前国槐叶 FT-IR 谱图[见图 2(a)]可知: 3400cm^{-1} 附近的宽峰为—OH 的伸缩振动,表明含有大量—OH; 1640cm^{-1} 附近的峰

主要缘于 C=C 键的伸缩振动; 1400cm^{-1} 附近的吸收峰由 O—H 在面内振动导致; 1050cm^{-1} 附近为醚键 $\text{CH}_2\text{—O—CH}_2$ 的吸收峰。从改性国槐叶[见图 2(b)]及吸附亚甲基蓝后的改性国槐叶[见图 2(c)] FT-IR 谱图可看出,两者的主吸收峰在吸附后均有明显的变化,其中—OH、C=C、 $\text{CH}_2\text{—O—CH}_2$ 键吸收峰强度变小、且出峰位置发生小幅左移,说明这些基团均参与了改性国槐叶对亚甲基蓝的吸附过程。

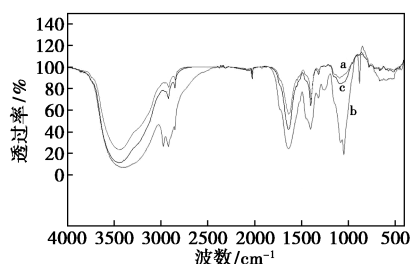


图 2 改性前后国槐叶及吸附亚甲基蓝的改性国槐叶 FT-IR 谱图

(a:改性前;b:改性后;c:吸附亚甲基蓝的改性国槐叶)

2.5 单因素试验结果分析

单因素试验结果见图 3。由图 3(a)可知:吸附率随改性国槐叶加入量提高先增加后趋于稳定,改性国槐叶加入量为 0.9g 时,吸附率最大,为 94.50% 。吸附量随着改性国槐叶加入量增加逐渐降低。原因可能是随着加入量的增多,有效吸附官能团增多,但亚甲基蓝质量浓度不变,因此改性国槐叶吸附量减少。由图 3(b)可知:随着改性国槐叶粒径的增大,吸附率与吸附量均增加;改性国槐叶粒径为 150 目时,吸附效果最佳,吸附率为 94.57% ,吸附量为 $20.27\text{mg}/\text{g}$ 。因为改性国槐叶粒径越小其比表面积越大,吸附接触面积便增加,因此吸附效果佳。由于目数越大颗粒粒径越小,需要粉碎多次,且收率很低,考虑到高效经济等原因,确定采用粒径 80 目的改性国槐叶。由图 3(c)可知:随着亚甲基蓝初始质量浓度的提高,吸附量增加。因改性国槐叶总量不变,当亚甲基蓝初始质量浓度提高时,改性国槐叶与亚甲基蓝分子接触几率增加,可以充分利用改性国槐叶表面的吸附位点,因此吸附量增加。由图 3(d)可知:吸附率和吸附量随着吸附时间的延长逐渐增大,100min 内吸附率和吸附量呈现较快上升趋势,之后缓慢增长。快速增长阶段,活性位点结合速度快;缓慢增长阶段,活性位点基本与亚甲基蓝结合,吸附量缓慢增加直至趋于稳定。从图看出,吸附时间为 240min 时,最大吸附率为 96.59% 。由图 3(e)

可知:吸附率和吸附量随着吸附温度的提高逐渐降低。吸附温度为 20℃ 时,吸附率和吸附量均最大,分别达到 93% 和 19.93mg/g。原因可能是吸附为放热过程,升高温度不利于吸附反应的进行,因此宜在室温条件下进行吸附反应。由图 3(f)可知:吸附率和吸附量均随溶液 pH 增加先增大后减小;pH=8 时,吸附率和吸附量均最高,分别为 89.11% 和 19.10mg/g;碱性条件下的吸附量高于酸性条件的吸附量,可能是因为酸性条件下溶液中 H^+ 与活性吸附位点结合,造成吸附量和吸附率降低。

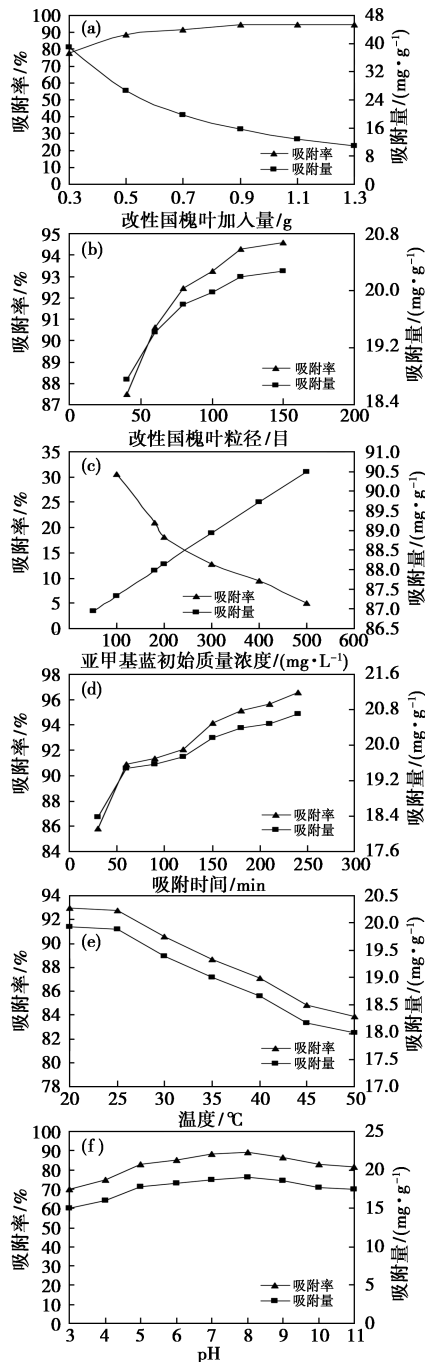


图3 单因素试验结果

2.6 二次回归正交旋转优化设计及验证

利用 DPS 数据处理系统对二次回归正交旋转组合设计实验结果进行分析,得到亚甲基蓝初始质量浓度(X_1)、改性国槐叶加入量(X_2)、吸附时间(X_3)及吸附率(Y)的数学模型回归方程:

$$Y = 93.47079 + 0.13197X_1 + 0.24047X_2 + 0.44167X_3 - 0.00489X_1^2 + 0.02693X_2^2 - 0.13393X_3^2 + 0.02250X_1X_2 - 0.01000X_1X_3 - 0.18000X_2X_3 \quad (3)$$

通过方差分析可求出:

$$F_1 = MS_{\text{失拟}}/MS_{\text{误差}} = 1.47301 < F_{0.05(5,8)} = 3.69 \quad (4)$$

$$F_2 = MS_{\text{回归}}/MS_{\text{剩余}} = 5.19108 > F_{0.01(9,13)} = 4.19 \quad (5)$$

式中, F_1 表示失拟 F 检验值; $MS_{\text{失拟}}$ 表示失拟均方, $MS_{\text{误差}}$ 表示失拟误差; $F_{0.05(5,8)}$ 表示自由度(5,8)5%显著水平的 F 值; F_2 表示回归 F 检验值; $MS_{\text{回归}}$ 表示回归均方; $MS_{\text{剩余}}$ 表示剩余均方; $F_{0.01(9,13)}$ 表示自由度(9,13)1%极显著水平的 F 值。

由式(4)可知: $F_1 < F_{0.05(5,8)}$ 达极显著水平,表明未知影响因素对结果影响较小,可忽略不计。由式(5)可知, $F_2 > F_{0.01(9,13)}$ 达极显著水平,说明回归模型的预测值和实际相吻合,模型成立。吸附率与亚甲基蓝初始质量浓度(X_1)、改性国槐叶加入量(X_2)、吸附时间(X_3)的相关指数 $R^2 = \text{回归平方和}/\text{总平方和} = 78.23\%$,其他实验因素的影响与误差占 21.77%。

对回归系数进行显著性检验,剔除 10%显著水平($\alpha = 0.10$)水平上的不显著项,对剩余项再次进行方差分析,得到简化回归方程:

$$Y = 93.47079 + 0.24047X_2 + 0.44167X_3 \quad (\alpha = 0.10) \quad (6)$$

双因子交互作用中, X_2X_3 影响较显著。改性国槐叶加入量(X_2)和吸附时间(X_3)对吸附率(Y)的影响(其他因子为零水平)见表 3。由表可知:在亚甲基蓝初始质量浓度不变的条件下,随着改性国槐叶加入量的增加,吸附率逐渐增大;改性国槐叶加入量不变时,吸附率随亚甲基蓝初始质量浓度的增加逐渐减小;在吸附时间 140min、亚甲基蓝初始质量浓度为 250mg/L 时,吸附率最大,为 94.62%;在吸附时间 100min、亚甲基蓝初始质量浓度为 450mg/L 时,吸附率最小,为 92.32%。

利用 DPS 数据处理系统对二次回归正交旋转组合设计实验数据进行分析,得到最大吸附率,即在亚甲基蓝初始质量浓度 250mg/L、吸附时间 140min、改性国槐叶加入量为 1.2g 条件下,预测的最大吸附率为 94.62%。此条件下,实测的最大吸附率为 94.43%。实际值/模型最佳值 = 0.998,接近于 1,说明此最佳组合可靠。

表 3 改性国槐叶加入量(X_2)和吸附时间(X_3)对吸附率(Y)的影响

水平 X_2X_3	水平编码值								
	-1.6818	-1.3409	-1	-0.5	0	0.5	1	1.3409	1.6818
1.682	93.1324	93.2830	93.4335	93.6544	93.8752	94.0960	94.3169	94.4674	94.6180
1.341	93.0504	93.2010	93.3516	93.5724	93.7932	94.0141	94.2349	94.3855	94.5360
1	92.9685	93.1190	93.2696	93.4904	93.7113	93.9321	94.1529	94.3035	94.4540
0.5	92.8482	92.9988	93.1494	93.3702	93.5910	93.8119	94.0327	94.1832	94.3338
0	92.7280	92.8786	93.0291	93.2500	93.4708	93.6916	93.9125	94.0630	94.2136
-0.5	92.6078	92.7583	92.9089	93.1297	93.3506	93.5714	93.7922	93.9428	94.0933
-1	92.4875	92.6381	92.7886	93.0095	93.2303	93.4511	93.6720	93.8225	93.9731
-1.341	92.4055	92.5561	92.7067	92.9275	93.1483	93.3692	93.5900	93.7406	93.8911
-1.682	92.3236	92.4741	92.6247	92.8455	93.0664	93.2872	93.5080	93.6586	93.8092

2.7 等温吸附研究

等温吸附模型常用来判断吸附行为,为深入研究改性国槐叶对亚甲基蓝的吸附机理,采用 Langmuir 和 Freundlich 等温吸附模型^[17-18]对最佳吸附温度下的吸附数据进行线性拟合。

Langmuir 和 Freundlich 等温吸附方程分别见式(7)、式(8):

$$\frac{C}{q} = \frac{C}{q_m} + \frac{1}{q_m b} \quad (7)$$

$$q = K \cdot C^{1/n} \quad (8)$$

式中, q_m 为饱和吸附量,mg/g; b 为吸附平衡常数; K 为 Freundlich 常数; n 为经验系数。

利用 Langmuir 和 Freundlich 模型分别对亚甲基蓝的吸附等温曲线进行线性拟合,拟合结果见图 4、图 5。

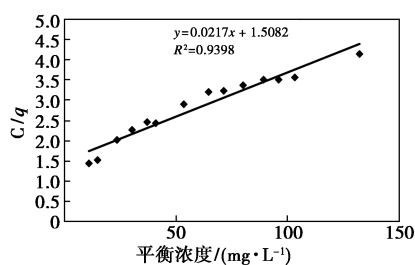


图 4 利用 Langmuir 模型拟合的吸附等温曲线图

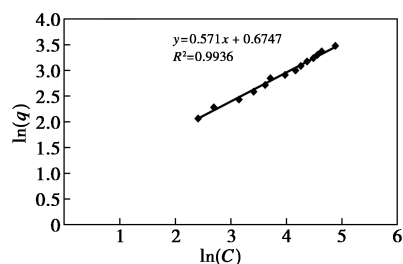


图 5 利用 Freundlich 模型拟合的吸附等温曲线图

从图 4 可知:用 Langmuir 模型拟合的线性方程为 $y = 0.0217x + 1.5082$, 相关系数 $R^2 = 0.9398$ 。从图 5 可知:用 Freundlich 模型拟合的线性方程为 $y = 0.571x + 0.6747$, 相关系数 $R^2 = 0.9936$ 。2 个模型拟合的线性方程中相关系数 R^2 均大于 0.9, 都能很好地描述改性国槐叶对亚甲基蓝的吸附行为, 其中, 用 Freundlich 模型拟合的结果与实验数据更吻合, 说明改性国槐叶对亚甲基蓝的吸附更符合 Freundlich 模型所描述的规律, 吸附过程为多活性位点的多层吸附^[19]。根据 Langmuir 模型计算出改性国槐叶对亚甲基蓝的饱和吸附量为 46.08mg/g。 n 一般与吸附体系的性质有关, 当 $0.1 < n < 0.5$ 时, 有利于吸附; 当 $1/n > 2$ 时难以吸附。Freundlich 等温吸附方程中, $1/n = 0.57$, 表明吸附反应相对容易发生。

2.8 吸附动力学研究

吸附动力学主要用于分析吸附速率与吸附时间的关系, 吸附速率控制着吸附达到平衡的时间, 是衡量吸附剂性能的重要指标。在吸附动力学研究中, 通常采用准一级、准二级速率方程来描述污染物浓度随时间的变化关系。准一级吸附动力学模型是基于假定吸附受扩散步骤控制, 准二级吸附动力学模型是基于假定吸附速率由化学吸附过程控制^[17-18]。准一级、准二级吸附动力学方程分别见式(9)、式(10):

$$\lg(q_e - q_t) = \lg q_e - k_1 t / 2.303 \quad (9)$$

$$t/q_t = 1/(k_2 q_e^2) + t/q_e \quad (10)$$

式中, q_e 为平衡吸附量,mg/g; q_t 为 t 时刻的吸附量,mg/g; 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, $\text{g}/(\text{mg} \cdot \text{min})$; t 为吸附时间, min。

利用准一级、准二级吸附动力学模型对亚甲基蓝吸附动力学曲线进行拟合,拟合结果见图6。

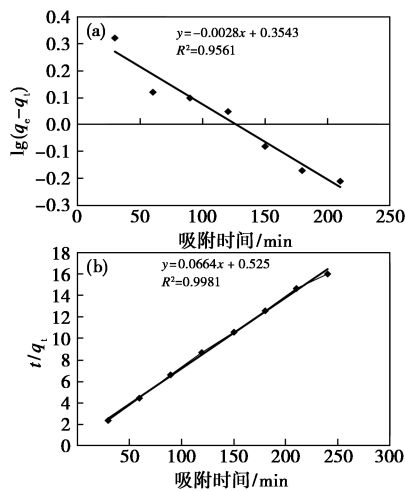


图6 利用准一级(a)、准二级吸附动力学模型(b)拟合的亚甲基蓝吸附动力学曲线图

用准一级吸附动力学模型拟合的线性方程为 $y = -0.0028x + 0.3543$, 相关系数 $R^2 = 0.9561$; 用准二级吸附动力学模型拟合的线性方程为 $y = 0.0664x + 0.525$, 相关系数 $R^2 = 0.9981$, 相关系数明显大于准一级线性拟合方程。说明改性国槐叶对亚甲基蓝的吸附遵循准二级吸附动力学模型, 吸附过程主要为化学吸附。从实验结果可知, 10min 内亚甲基蓝质量浓度达到国家二级排放标准 180mg/L, 30min 内其质量浓度从 250mg/L 降到 35.425mg/L, 达到国家一级标准 50mg/L。

2.9 吸附效果对比

在 5 组质量浓度不同的亚甲基蓝溶液中, 分别加入 1.2g 改性国槐叶(80 目, 孔径 0.2mm)、活性炭(60~16 目, 孔径 0.315~1.25mm)、大孔吸附树脂 AB-8(5~10 目, 孔径 2~4mm)、硅藻土(120~150 目, 孔径 0.1~0.125mm), 室温条件下静置吸附 1h, 测定上清液的吸光度, 计算吸附率。改性国槐叶、活性炭、大孔树脂 AB-8、硅藻土对碱性品红的吸附效果对比如图 7 所示。

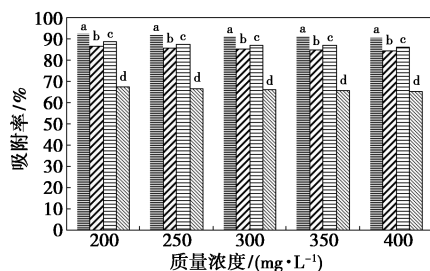


图7 材料吸附效果对比

(a: 改性国槐叶; b: 大孔树脂 AB-8; c: 活性炭; d: 硅藻土)

通过 F 检验得出: 不同吸附材料、质量浓度不同的亚甲基蓝溶液及吸附材料与亚甲基蓝质量浓度之间均存在 1% 水平的极显著差异 ($F_{\text{材料}} = 105193.3, P = 0.0001 < 0.01$; $F_{\text{浓度}} = 463.072, P = 0.0001 < 0.01$; $F_{\text{材料} \times \text{浓度}} = 6.339, P = 0.0001 < 0.01$, 其中 P 表示显著性差异); 在 1% 极显著水平上改性国槐叶对亚甲基蓝的吸附效果明显高于其他材料, 活性炭次之, 大孔吸附树脂较差, 硅藻土吸附效果最差。

3 结论

(1) 在改性国槐叶加入量 1.2g、吸附时间 140min、亚甲基蓝初始质量浓度 250mg/L 条件下, 利用 DPS 数据处理系统预测的最大吸附率为 94.62%。在此条件下, 最大吸附率实测值为 94.43%, 实际值/预测值 = 0.998, 接近于 1, 说明模型成立。

(2) 利用 Langmuir 和 Freundlich 模型分别对 20℃ 亚甲基蓝吸附等温线进行拟合, 结果表明 Freundlich 模型可以较好地描述改性国槐叶对亚甲基蓝的吸附行为, 吸附过程为多位点不均匀分子层吸附。根据 Langmuir 模型计算出改性国槐叶对亚甲基蓝的饱和吸附量为 46.08mg/g。

(3) 改性国槐叶对亚甲基蓝的吸附遵循准二级吸附动力学模型, 相关系数高达 0.99 以上。实验结果表明, 10min 内亚甲基蓝达到国家二级排放标准 180mg/L, 30min 内亚甲基蓝质量浓度从 250mg/L 降到 35.425mg/L, 达到国家一级排放标准 50mg/L, 说明改性国槐叶对亚甲基蓝的吸附是以化学吸附为主的物理化学混合吸附过程。

(4) 在 1% 极显著水平上, 对亚甲基蓝的吸附效果从强到弱为改性国槐叶 > 活性炭 > 大孔树脂 > 硅藻土。

(5) 改性国槐叶具有高度疏松褶皱结构, 比表面积达 133.053m²/g, 含—OH 等极性基团, 对亚甲基蓝有很好的吸附性能。

参考文献

- [1] 许丹宇, 石岩, 张洪雷. 印染废水处理与回用的工艺设计与应用[J]. 给水排水, 2015, 41(3): 49-52.
- [2] 王俊峰, 赵英武, 毛艳芳. 我国印染废水处理概况及研究进展[J]. 中国环保产业, 2012, 30(4): 30-33.
- [3] 朱振华, 李小敏, 张艺, 等. 改性橘皮对水中碱性品红的吸附[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(5): 334-336.

(下转第 210 页)