

汪燕南,李文文,孙运飞,等. 改性甘蔗渣去除模拟废水中孔雀石绿的研究[J]. 环境工程技术学报,2016,6(5):434-439.

WANG Y N, LI W W, SUN Y F, et al. Removal of malachite green in simulated wastewater by modified bagasse [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2016, 6(5): 434-439.

改性甘蔗渣去除模拟废水中孔雀石绿的研究

汪燕南,李文文,孙运飞,赵广超*

安徽师范大学环境科学与工程学院,安徽 芜湖 241003

摘要 选用甘蔗渣作为原料,通过微波法合成 Fe_3O_4 磁改性甘蔗渣(MB),用柠檬酸进行化学改性,制备出能够快速、简便分离且吸附效果好的生物质吸附剂,用于去除模拟废水中的孔雀石绿(MG)。对比了甘蔗渣改性前后对孔雀石绿的去除效果;采用 SEM 和 FTIR 对甘蔗渣改性前后的结构和组分进行了表征;通过吸附动力学试验以及平衡试验探究吸附机理;测试了温度、pH 以及吸附剂投加量对吸附结果的影响。结果表明:改性甘蔗渣吸附孔雀石绿的过程符合二阶动力学模型和 Langmuir 模型;对于 50 mL 初始浓度为 20 mg/L 的孔雀石绿溶液,在 pH 为 7.5、温度为 50 °C 时,只需添加 15 mg 的吸附剂便能达到 98% 的去除率,吸附量为 140.20 mg/g,较未改性的甘蔗渣提高了将近 1 倍。

关键词 甘蔗渣;改性;吸附去除;孔雀石绿

中图分类号:X703 文章编号:1674-991X(2016)05-0434-06 doi:10.3969/j.issn.1674-991X.2016.05.064

Removal of Malachite Green in Simulated Wastewater by Modified Bagasse

WANG Yannan, LI Wenwen, SUN Yunfei, ZHAO Guangchao

Department of Environmental Science and Engineering, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China

Abstract Using sugarcane bagasse as raw material, the microwave method was applied for the synthesis of Fe_3O_4 magnetically modified bagasse. Then a chemical modification was followed by the use of citric acid, and finally a kind of biomass adsorbent which could be quickly and easily separated and had good adsorption effect was prepared for removal of malachite green in simulation wastewater. The removal effect of malachite green between bagasse before and after modification was compared, and the structure and components of the two kinds of materials were characterized by SEM and FTI. The adsorption mechanism was explored applying adsorption kinetics experiment and equilibrium experiment, and the influence of the temperature, pH and adsorbent dosage on the adsorption tested. The result shows that the adsorption process conforms to the Pseudo-second order kinetic model and the Langmuir model. For 50 mL malachite green solution with the initial concentration of 20 mg/L, under the pH of 7.5 and the temperature of 50 °C, the removal rate of 98% could be reached by adding 15 mg of sorbent. The adsorption amount was 140.20 mg/g, nearly double of that by bagasse with no modification.

Key words bagasse; modification; adsorption; malachite green

孔雀石绿(MG)是种三苯甲烷类染料,早期应用于纺织、造纸、皮革、塑料、橡胶、化妆品、医药和食品等工业^[1],因其具有高效的杀菌作用,曾一度被作为渔业和水产养殖业的杀菌剂和杀虫剂使用。20

世纪90年代,研究人员发现孔雀石绿具有高毒性、致癌性、诱变性以及难降解性^[2],因此对于改善水环境污染问题,孔雀石绿的无害化处理显得尤为重要。

收稿日期:2016-02-29

基金项目:安徽师范大学2015年度研究生科研创新与实践项目(2015cxsj177)

作者简介:汪燕南(1991—),女,硕士研究生,主要从事吸附材料的制备及其应用研究,wangyannan7431@126.com

* 责任作者:赵广超(1963—),男,教授,博士,主要从事环境分析化学、环境污染物的吸附去除等研究,gczhao@mail.ahnu.edu.cn

染料去除方法归纳为生物法、化学法以及物理法3种^[3]。生物法利用假单胞菌属菌株 *Pseudomonas pseudomallei* 13NA 对三苯基甲烷类染料中的甲基紫和结晶紫进行脱色^[4]。化学法^[3]有混凝法、电化学氧化法、光催化氧化法以及超声波降解技术等,如夏阁遥等^[2]就通过制备磁性 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4$ 复合光催化剂来催化降解孔雀石绿。物理法也是常用的去污方法,其中吸附法因操作简便、稳定性好、高效经济等优势而被优先考虑,各种吸附材料的制备尤其是以农作物秸秆为原料的吸附材料的制备成为研究热点,如 Baldikova 等^[5]研究了改性黑麦秸秆对甲基绿和酸性橙的去除;李薇等^[6]研究了孔雀石绿在高岭土上的吸附行为。

试验选用甘蔗渣作为原材料,其原因为:1)我国甘蔗产量位居世界第三,仅次于巴西和印度,具有量大面广的特点;2)甘蔗渣的组成以纤维素、半纤维素、木质素为主,伴随少量淀粉、蛋白质及可溶性糖^[7],甘蔗渣具有灰分含量低(8.3%)的特点,因此用于生物转换比其他农作物残渣有更大的优势。笔者通过甘蔗渣的磁改性和化学改性,制备出能够简便、快速分离且能有效去除模拟废水中孔雀石绿的吸附材料。测试了溶液的温度、pH 以及吸附剂投加量对吸附效率的影响;确定了最优吸附条件,对甘蔗渣改性前后吸附孔雀石绿的能力进行了对比;通过电子显微镜扫描(SEM)和红外光谱分析仪(FTIR)表征了其改性前后的结构组分变化,并对吸附机理进行了探究。

1 试验

1.1 仪器与试剂

试剂: $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、孔雀石绿、柠檬酸、磷酸(均购于国药集团化学试剂有限公司),无水乙酸钠(上海试剂一厂综合经营公司),氢氧化钠(中国医药集团上海化学试剂公司)。所用试剂均为分析纯,试验用水均为蒸馏水。

仪器:V-5000/72 系列可见分光光度计(上海元析仪器有限公司)、SHZ-82 水浴恒温振荡器(江苏省金坛市金城国盛实验仪器厂)、KQ-250 型超声清洗器(昆山市超声仪器有限公司)、S-4800 型场发射扫描电子显微镜(岛津公司)、FTIR-8400S 型傅里叶变换红外光谱仪(岛津公司)、MDS-2003F 型微波装置(新仪微波化学科技有限公司)、永磁铁(合肥高树磁性材料有限公司)、PHC-3C 酸度计(上海精密

科学仪器有限公司)。

1.2 材料制备

1.2.1 材料前处理

甘蔗渣取自当地水果店,剪成小段后用自来水洗净。在烘箱中 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 烘干 24 h,用粉碎机粉碎并过 120 目筛,粉末密封储存,备用。

1.2.2 甘蔗渣的磁改性

四氧化三铁(Fe_3O_4)的制备采用微波合成法:将 0.375 g 的 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 溶解于 20 mL 乙二醇溶液中,超声溶解后加入 0.9 g 无水乙酸钠,混匀后的液体转移至微波装置中合成 Fe_3O_4 ^[8],经过多次磁吸清洗后配制成 0.005 mg/L 的 Fe_3O_4 溶液,称取 0.4 g 甘蔗渣粉末与 20 mL 的 Fe_3O_4 水溶液搅拌均匀后转移至微波装置中,同样用微波法合成了磁改性的甘蔗渣,用蒸馏水磁吸洗涤并烘干待用。

1.2.3 化学改性

为了进一步提高吸附效率,对磁改性甘蔗渣进行化学改性^[5]。磁性甘蔗渣与 0.5 mol/L 柠檬酸以 1:12 的质量体积比混合,搅拌 30 min 后于 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干 24 h。柠檬酸与甘蔗渣的水热反应通过升高温度到 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 持续 60 min 实现,制备的材料最终用蒸馏水清洗至中性并烘干。

1.3 试验

1.3.1 表征

通过 FTIR 以及 SEM,分析改性前后甘蔗渣红外图谱中官能团的变化,以及 SEM 图中甘蔗渣改性前后表面孔隙及其他结构特征来研究吸附机理。

1.3.2 吸附

选取吸附剂投加量、孔雀石绿的 pH 以及吸附温度 3 个因素,采用控制变量法考察改性甘蔗渣对于吸附的影响。通过单因素试验选取最佳吸附条件,确定最优吸附条件之后,在最优吸附条件下分别用甘蔗渣及改性甘蔗渣(modified bagasse, MB)吸附孔雀石绿,比较其吸附差异。

动力学试验在 100 mL 初始浓度为 20 mg/L 的孔雀石绿溶液中进行,当 pH 为 7.5,吸附温度为 $50\text{ }^\circ\text{C}$,吸附剂投加量为 0.01 g 时,检测不同时间孔雀石绿的吸附量,并将所得数据采用一阶动力学模型和二阶动力学模型进行分析;平衡试验分别取 50 mL 初始浓度为 0.5、10、15 和 20 mg/L 的孔雀石绿溶液,在吸附温度为 $50\text{ }^\circ\text{C}$,pH 为 7.5,吸附剂投加量为 0.005 g 时,测定吸附达到平衡时孔雀石绿的

吸附量。衡量孔雀石绿去除效果的吸附量(q_e)的计算公式:

$$q_e = \frac{(c_0 - c_e)V}{m} \quad (1)$$

式中: q_e 为孔雀石绿的吸附量,mg/g; c_0 和 c_e 分别为孔雀石绿的初始浓度和吸附平衡时的浓度,mg/L; m 为吸附剂的投加量,g; V 为孔雀石绿的体积,L。

2 结果与讨论

2.1 表征

对改性前后的甘蔗渣进行了红外光谱测试,结果如图 1 所示。甘蔗渣中含有一COOH, —NH 等官能团,3 400 cm^{-1} 波长的吸收峰为 O—H 和 N—H 的伸缩振动^[9],2 922 cm^{-1} 波长处为 C—H 的伸缩振动。改性后的甘蔗渣在 1 736 cm^{-1} 波长附近出现了自由羧基的—C=O 峰,且在 1 250 cm^{-1} 波长左右增加了碳氧键的伸缩振动,表明柠檬酸成功改性了甘蔗渣。1 100 cm^{-1} 波长处为纤维素中 β -(1-4)糖苷键中 C—O—C 的吸收峰^[10],改性后该处峰明显减弱甚至消失,表明改性过后甘蔗渣中的纤维素链状结构在一定程度上被打开,与柠檬酸发生了反应。

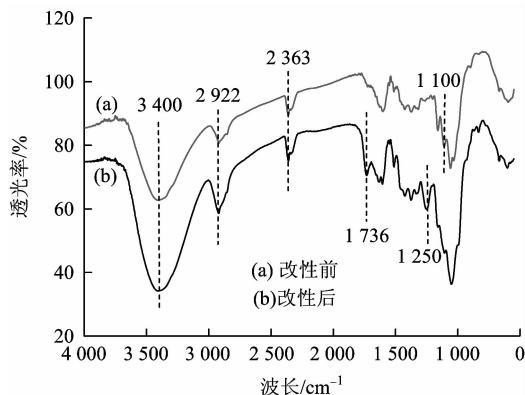
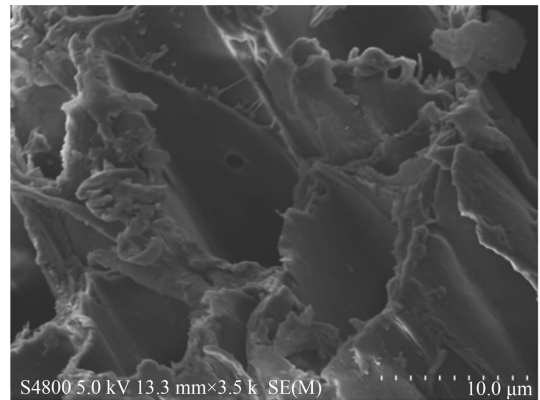


图 1 甘蔗渣改性前后红外光谱对比

Fig. 1 The contrast FTIR figure of bagasse before and after modification

SEM 图能呈现材料的表面结构及孔隙情况,图 2 为甘蔗渣改性前后的 SEM 图。由图 2(a)可见,由于大量纤维素的存在,改性前甘蔗渣,能看见管状结构且材料表面比较光滑;由图 2(b)可见,改性后的甘蔗渣,其表面粗糙、凹凸不平,使得吸附过程中吸附剂与吸附质的接触面积增大。改性后的甘蔗渣表面有大量 Fe_3O_4 纳米球形颗粒,表明 Fe_3O_4 附着在甘蔗渣上使得甘蔗渣实现了磁改性。



(a) 改性前



(b) 改性后

图 2 改性前后甘蔗渣的 SEM

Fig. 2 SEM image of sugarcane residue before and after modification

2.2 吸附

2.2.1 吸附条件的影响

试验所用孔雀石绿溶液的体积均为 50 mL,初始浓度均为 20 mg/L,进行单因素试验。调节 pH 为 2.0、4.0、6.0 和 8.0,待 pH 稳定后确定各 pH 对应的最大吸收波长,加入等量吸附剂在同等温度条件下测吸附去除率,以确定最佳 pH(图 3);在 pH 及吸附剂投加量分别为 7.5 和 0.005 g 时,设温度为 30、40、50 和 60 $^{\circ}\text{C}$ 4 个水平,以选取最佳温度(图 4);在温度和 pH 为 50 $^{\circ}\text{C}$ 和 7.5 时,分别加入 0.005、0.010、0.015 和 0.020 g 改性甘蔗渣,测其对孔雀石绿的去除率,以确定最优吸附剂投加量(图 5)。

由图 3 可知,pH 的升高大大提升了孔雀石绿的去除率。孔雀石绿水溶液为阳离子溶液,柠檬酸改性引入的羧基提高了甘蔗渣的净负电荷,因而也提高了甘蔗渣对于阳离子污染物的结合能力^[11];同时,pH 对纳米 Fe_3O_4 的影响直接导致了吸附效果的差异,一般认为纳米铁氧化物在溶液中形成羟基化表面,会因 pH 的不同而质子化或去质子化^[12];

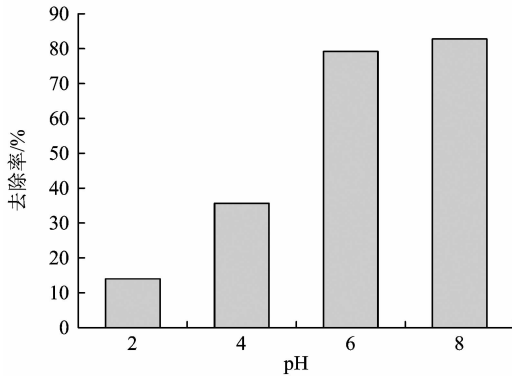


图3 孔雀石绿溶液的 pH 对吸附的影响

Fig. 3 The influence of pH on the adsorption efficiency of the malachite green solution

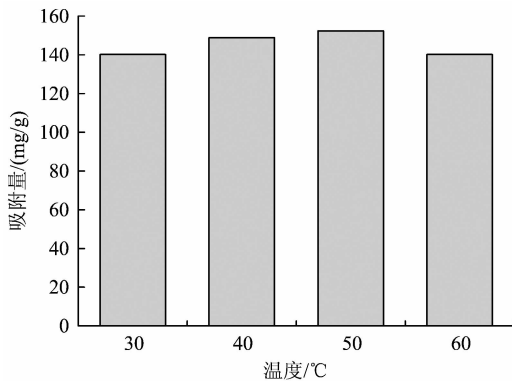


图4 吸附温度对吸附的影响

Fig. 4 The influence of adsorption temperature

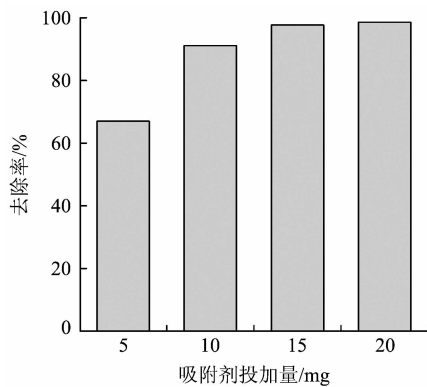


图5 吸附剂投加量对吸附的影响

Fig. 5 The influence of the dosage of adsorbent

Fe_3O_4 的等电点为 6.5^[13], 当 pH 大于等电点时, 铁氧化物表面带负电荷, 容易吸附溶液中的阳离子, 且 pH 越大吸附性能越强。因此, pH 对吸附的影响也进一步验证了该吸附过程是一个化学吸附过程。

从图 4 可以看出, 温度对吸附效果的影响较小,

50 °C 时的吸附量略微高一些, 因此在实际应用中, 如果选择室温作为吸附温度更加节省耗能。从图 5 可以看出, 吸附剂量达 10 mg 以后吸附接近饱和, 去除率趋于稳定, 与 Langmuir 模型中的有限数量吸附位点相一致, 最终平衡吸附去除率几乎达到 100%。在最优吸附条件下, 甘蔗渣吸附孔雀石绿的吸附量为 75.88 mg/g, 改性甘蔗渣的吸附量为 140.20 mg/g, 增加了将近 1 倍, 因此改性甘蔗渣对孔雀石绿的去除效果比较显著。

2.2.2 吸附动力学试验

动力学研究是吸附过程工艺设计的基础, 并有助于探讨吸附机理。应用一阶和二阶动力学模型模拟吸附过程。一阶吸附模型采用 Lagergren 一阶动力学吸附方程计算其吸附速率^[14], 其方程式如下:

$$\ln(1 - F) = -k_1 \cdot t \quad (2)$$

$$F = q_t/q_e$$

式中: q_e 和 q_t 分别为吸附平衡和 t 时吸附材料对吸附质的吸附量, mg/g; k_1 为一阶吸附速率常数, min^{-1} 。

二阶吸附模型采用 PSO (pseudo-second order kinetic model) 二阶动力学模型设立, 假设吸附速率是由吸附剂表面上未被占有的吸附位点数目的平方值决定的^[15-16], 其表达式为:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (3)$$

式中 k_2 为二阶动力学速率常数, $\text{g}/(\text{mg} \cdot \text{min})$ 。

根据式(3)能够做出 t/q_t 关于 t 的线性曲线, 并由曲线斜率得到 q_e 和 k_2 。由于化学键的形成是二阶动力学的主要影响因子^[17], 故吸附过程符合二阶动力学模型表明吸附过程以化学吸附为主。

图 6 为改性甘蔗渣对孔雀石绿的吸附量随时间变化趋势。从图 6 可以看出, 40 min 后吸附过程基本平衡。

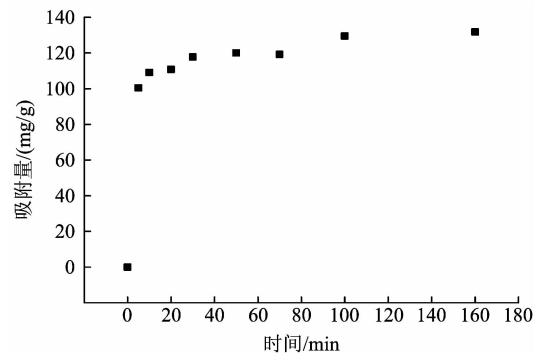


图6 改性甘蔗渣对孔雀石绿的吸附量随时间的变化

Fig. 6 The time change curve of absorption quantity for modified bagasse to malachite green

表 1 为 2 种动力学模型拟合的参数,二阶动力学能更好地描述该吸附过程,表明改性甘蔗渣吸附孔雀石绿的过程主要为化学吸附。

表 1 改性甘蔗渣吸附孔雀石绿动力学拟合结果

Table 1 The adsorption kinetics fitting result of modified bagasse for malachite green

吸附剂	一阶动力学		
	$q_e/(mg/g)$	k_1/min^{-1}	R^2
改性甘蔗渣	55.31	0.039 8	0.771 2
吸附剂	二阶动力学		
	$q_e/(mg/g)$	$k_2/[g/(mg \cdot min)]$	R^2
改性甘蔗渣	131.58	0.002 55	0.997 7

表 2 Freundlich 和 Langmuir 等温模型表达式

Table 2 The isothermal model expression of Langmuir and Freundlich

项目	Freundlich 吸附等温式	Langmuir 吸附等温式
公式	$q_e = k \cdot C^{1/n}$ 或 $\lg q_e = \lg k + \frac{1}{n} \lg C$	$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_{max}} + \frac{1}{q_{max} b} \times \frac{1}{c_e}$ 或 $\frac{c_e}{q_e} = \frac{1}{q_{max} b} + \frac{c_e}{q_{max}}$
说明	C 为溶质浓度,mg/L; k 为 $\lg C = 0$ 时的吸附量,可以大致表示吸附能力的强弱; n 反映了吸附作用的强度	q_e 和 q_{max} 分别为吸附剂的平衡吸附量和最大吸附量,mg/g; b 为吸附平衡常数, L/mg; c_e 为吸附平衡时浓度,mg/L

表 3 给出了等温试验的结果。对 2 种等温模型进行拟合,结果如表 4 所示。由表 4 可知,改性甘蔗渣吸附孔雀石绿的过程更符合 Langmuir 模型,拟合系数为 0.992 1, q_{max} 为 156.25 mg/g,与 2.2.1 节的试验结果基本一致,表明吸附过程为单层吸附。

表 3 吸附平衡试验结果

Table 3 The results of adsorption equilibrium test

孔雀石绿浓度/(mg/L)		吸附量/(mg/g)
初始	平衡	
0	0	0
5	0.145	56.86
10	0.638	103.92
15	2.157	136.93
20	4.313	152.67

表 4 改性甘蔗渣吸附孔雀石绿等温模型拟合结果

Table 4 The isothermal model fitting result of modified bagasse for malachite green

Freundlich 模型			Langmuir 模型		
n	k	R^2	$q_{max}/(mg/g)$	$b/(L/mg)$	R^2
3.43	106.6	0.947 3	156.25	4.92	0.992 1

2.2.3 吸附平衡试验

吸附等温模型是与吸附特性密切相关的,其反映了吸附量同吸附质浓度之间的关系。对试验数据进行了 Freundlich 等温模型、Langmuir 等温模型分析,如表 2 所示。Langmuir 模型假定是在吸附位点数量有限的均匀表面上的单层吸附。Freundlich 模型描述了非理想的可逆吸附的关系^[18];模型适用于吸附分子之间的相互作用的非均匀表面上的吸附, Freundlich 方程的应用也表明吸附能量随着吸附剂的吸附中心形成呈指数下降。

3 结论

引入纳米 Fe_3O_4 对甘蔗渣进行磁改性,使得吸附后的固液分离更加方便,同时提高了对孔雀石绿的吸附能力;引入羧基团进一步进行化学改性更加提高了甘蔗渣吸附活性。结果表明:改性甘蔗渣吸附孔雀石绿过程符合二阶动力学和 Langmuir 等温式,吸附以化学吸附为主并伴有一定的孔隙吸附,对于 50 mL 初始浓度为 20 mg/L 的孔雀石绿溶液,在 pH 为 7.5、温度为 50 °C 时,添加 15 mg 的吸附剂的吸附量为 140.20 mg/g,吸附去除率近 100%,去除效果远高于未改性甘蔗渣。因此,改性甘蔗渣的应用对于工业废水处理尤其是去除阳离子污染物具有十分重要的意义。

参考文献

[1] HASHEMIAN S, SALIMI M. Nanocomposita potential lowcost adsorbent for removal of cyanine acid[J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 188, 57-63.

[2] 夏阁遥,陈男,胡伟武,等. 磁性 Fe_3O_4/Ag_3PO_4 复合光催化剂催化降解染料废水中的孔雀石绿[J]. 环境工程学报, 2015, 9 (8): 3821-3827.

XIA G Y, CHEN N, HU W W, et al. Photocatalytic degradation of malachite green in dye wastewater by magnetical Fe_3O_4/Ag_3PO_4

- composite photocatalysts [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(8): 3821-3827.
- [3] 刘冬莲. 染料废水处理方法的研究进展[J]. 河南化工, 2004(12): 5-7.
LIU D L. Research progress on treatment methods of waste water containing dyestuff [J]. Henan Chemical Industry, 2004(12): 5-7.
- [4] YATOME C, OGAWA T, KOGA D, et al. Biodegradability of azo and triphenylmethane dyes by *Pseudomonas pseudomallei* 13NA [J]. Journal of the Society of Dyers and Colourists, 1981, 97(4): 166-168.
- [5] BALDIKOVA E, SAFARIKOVA M, SAFARIK I. Organic dyes removal using magnetically modified rye straw [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2015, 380: 181-185.
- [6] 李薇, 闫浩, 马宏飞, 等. 孔雀石绿在高岭土上吸附行为和模型研究[J]. 应用化工, 2015(3): 405-409.
LI W, YAN H, MA H F, et al. Study on the behavior and model of malachite green adsorption on kaolin [J]. Applied Chemical Industry, 2015(3): 405-409.
- [7] 吴苗苗. 不同预处理方法对甘蔗渣组成、结构及酶解产糖的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2010.
- [8] DENG H, LI X L, PENG Q, et al. Monodisperse magnetic single-crystal ferrite microspheres [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2005, 117(44): 2782-2785.
- [9] 姜玉, 庞浩, 廖兵. 甘蔗渣吸附剂的制备及其对 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Cr^{3+} 的吸附动力学研究 [J]. 中山大学学报(自然科学), 2008, 47(6): 32-37.
JIANG Y, PANG H, LIAO B. Preparation of bagasse adsorbents and investigation of their adsorption kinetic of $Pb(II)$, $Cu(II)$ and $Cr(III)$ [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2008, 47(6): 32-37.
- [10] SUFLET D M, CHITANU G C, POPA V I. Phosphorylation of polysaccharides; new results on synthesis and characterization of phosphorylated cellulose [J]. Reactive and Functional Polymers, 2006, 66: 1240-1249.
- [11] GONG R, JIN Y B, CHEN F Y, et al. Enhanced malachite green removal from aqueous solution by citric acid modified rice straw [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 137: 865-870.
- [12] 艾翠玲, 雷英杰, 张国春, 等. 纳米铁氧化物吸附处理重金属废水的研究进展 [J]. 化工环保, 2015, 35(6): 593-598.
AI C L, LEI Y J, ZHANG G C, et al. Research progresses on adsorption of heavy metals from wastewater using nano iron oxides [J]. Environment Protection of Chemical Industry, 2015, 35(6): 593-598.
- [13] 郑举功, 陈泉水, 杨婷. 磁性四氧化三铁纳米粒子的合成及表征 [J]. 无机盐工业, 2008, 40(11): 15-17.
ZHEN J G, CHEN Q S, YANG T. Synthesis and characterization of nano-sized magnetic ferroferric oxide particles [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2008, 40(11): 15-17.
- [14] 李坤权, 王艳锦, 杨美蓉, 等. 多胺功能化介孔炭对 $Pb(II)$ 的吸附动力学与机制 [J]. 环境科学, 2014, 35(8): 3198-3205.
LI K Q, WANG Y J, YANG M R, et al. Adsorption kinetics and mechanism of lead(II) on polyamine-functionalized mesoporous activated carbon [J]. Environmental Science, 2014, 35(8): 3198-3205.
- [15] XU X, GAO B Y, WANG W Y, et al. Adsorption of phosphate from aqueous solutions onto modified wheat residue; characteristics, kinetic and column studies [J]. Colloids and Surfaces B, 2009, 70(1): 46-52.
- [16] EL-KHAIARY M I, MALASH G F, YUH-SHAN H. On the use of linearized pseudo-second-order kinetic equations for modeling adsorption systems [J]. Desalination, 2010, 257(1/2/3): 93-101.
- [17] GHASEMI N, TAMRI P, KHADEMI A, et al. Linearized equations of pseudo second-order kinetic for the adsorption of $Pb(II)$ on pistacia atlantica shells [J]. IERI Procedia, 2013(5): 232-237.
- [18] MATOUQ M, JILDEH N, QTAISHAT M, et al. The adsorption kinetics and modeling for heavy metals removal of wastewater by Moringa pods [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2015, 3(2): 775-784. ○