

改性葡萄藤对水中次甲基蓝吸附特性的影响

何欢¹, 刘子龙^{2*}, 鲁建江², 杨宏飞²

(1. 上海华严检测技术有限公司, 上海 200082; 2. 石河子大学 化学化工学院, 新疆 石河子 832003)

摘要:以农林废弃物葡萄藤为原料, 选用 NaOH 为改性剂, 在最适的改性条件下制备葡萄藤吸附剂, 研究了改性后的葡萄藤对次甲基蓝的吸附性能。结果表明, 室温下用 0.5 g 改性葡萄藤, 处理浓度为 100 mg/L, pH 值为 6.8 的次甲基蓝溶液 50 mL, 振荡吸附 60 min, 吸附率可达 97.7%; 改性葡萄藤对次甲基蓝的吸附符合 Freundlich 方程所描述的规律, 吸附过程的 $\Delta G < 0$, ΔH 为 16.43 kJ/mol, ΔS 为 60.86 J/mol·K, 吸附过程符合拟二级动力学模型, E_a 为 27.85 kJ/mol, 吸附是自发的、吸热的熵驱动过程。

关键词:葡萄藤; 改性; 吸附; 次甲基蓝

中图分类号: X799

文献标志码: A

文章编号: 1001-7461(2016)05-0255-06

Adsorption Capability of Modified Grape Stalks to Methylene Blue

HE Huan¹, LIU Zi-long², LU Jian-jiang², YANG Hong-fei²

(1. Shanghai Hwayon Testing Technology Co., LTD., Shanghai 200082, China;

2. College of Chemical Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

Abstract: Grape stalks were modified by using sodium hydroxide. Under the optimal modification conditions, modified grape stalks adsorbent were prepared, and the adsorption properties of modified grape stalks to methylene blue from aqueous solutions were analyzed. The results showed that the adsorption rate of the modified grape stalk to methylene blue could reach 97.7% under the following conditions: methylene blue concentration, 100 mg/L; adsorbent dosage, 0.5 g; pH, 6.8; temperature, 25℃, oscillation time, 60 min. Absorptive isotherm to methylene blue well fitted with the Freundlich adsorption model. Thermodynamic parameters of Gibbs free energy (ΔG) was negative, enthalpy of adsorption (ΔH) value was 16.43 kJ/mol and the entropy (ΔS) value was 60.86 J/mol·K, the adsorption kinetics was well described by the proposed kinetic model II, the activation energy (E_a) was determined to be 27.85 kJ/mol, so the adsorption to methylene blue by modified grape stalks was a spontaneous, exothermic driven process.

Key words: grape stalk; modification; adsorption; methylene blue(MB)

纺织、印染行业是工业的重要组成部分, 排放的废水含有大量染料, 这些污染物不仅污染环境, 而且其降解产物有毒, 易在环境中富集^[1], 随食物链进入生物体内能诱发基因突变或致癌, 人们越来越重视对其处理方法的研究。

目前处理废水中染料的方法有: 混凝法^[2-3]、化学法^[4-9]、生物法^[10]、液膜法^[11-13]、吸附法^[14-15]等。

但这些方法都存在很大的缺点和局限性, 如固体残渣量多、试剂的使用量大、选择性不强、成本高、会造成二次污染、操作条件苛刻、在实践应用中很难推广等。近年来, 将农林废弃物进行改性制备成吸附剂或活性炭, 用于废水染料的处理, 效果良好, 这方面的研究和成果已有不少报道。B. H. Hameed^[16]等将一定量经过粉碎、干燥预处理后的花生壳, 放入初

收稿日期: 2015-11-04 修回日期: 2016-03-20

基金项目: 石河子大学优秀青年项目(2012ZRKXYQ04)。

作者简介: 何欢, 女, 硕士, 研究方向: 环境化学。

* 通信作者: 刘子龙, 男, 讲师, 研究方向: 环境化学。E-mail: liuzilong1999@163.com

始浓度为 100 mg/L 的固绿染料溶液中,吸附 36 h 后,吸附量可达 15.6 mg/g;V. K. Grag^[17] 等研究了木屑对孔雀石绿的吸附行为,采用甲醛和硫酸 2 种改性剂,吸附率分别为 86.9% 和 99.8%;Sonawane 等^[18] 对玉米棒进行改性制备成吸附剂,吸附过程进行 25 min 后,改性玉米棒对废水中的孔雀绿染料吸附量最大可达 80.64 mg/g;廖钦洪^[19] 等用 K₂CO₃ 活化稻壳制备活性炭,在 pH 为 6 时,活性炭对次甲基蓝的吸附量最高达 476.2 mg/g;张文轩^[20] 将小麦秸秆醚化改性,并引入羧甲基、季铵基团,对次甲基蓝和茜素绿均有良好的吸附效果,证明了其吸附行为为单分子层吸附,对吸附剂的再生也进行了成功尝试。此外,腰果壳^[21]、松针^[22]、花生壳^[23]、椰壳^[24] 等农林废弃物均经研究探讨可被用作吸附剂处理染料废水。

葡萄藤是葡萄种植生产过程中的副产物,大部分被当作燃料或废弃物,利用率很低,国内很少见到有关报道直接利用或化学改性葡萄藤制备吸附剂,将其用于废水处理方面的研究。新疆是中国葡萄的主产区,葡萄藤来源广,每年约有 16 万 t,将其综合利用用于废水处理,可实现葡萄藤的资源化和产业化,降低处理废水的成本,又能提高葡萄产业的附加值。本研究利用改性后的葡萄藤吸附水溶液中的次甲基蓝染料,探讨其吸附性能,并对其吸附工艺进行优化,以期葡萄藤的综合利用提供新的途径和理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

葡萄藤采集于石河子大学农学院试验田,用蒸馏水清洗,在 60~65℃ 下烘干 24 h,粉碎,过 20 目的筛子备用。

1.2 吸附质溶液

将次甲基蓝(生物染色剂)溶于蒸馏水中,配制 500 mg/L 的次甲基蓝标准储备液,试验中根据需要进行稀释,用可见分光光度计(722N,上海精密科学仪器有限公司)测定溶液中次甲基蓝的含量。

1.3 改性葡萄藤吸附剂的制备

选取 H₂SO₄、NaOH 及 HCHO 为改性剂,考察了改性剂浓度、用量、温度、时间对改性效果的影响,测试了改性葡萄藤对次甲基蓝的吸附效果。经单因素试验可知,以硫酸改性葡萄藤,最适的改性条件为:硫酸浓度为 10% w/v,每 1 g 葡萄藤的硫酸用量为 25 mL,搅拌均匀,在 70℃ 下改性 70 min;以 NaOH 改性葡萄藤,最适的改性条件为:NaOH 浓度为 0.08 mol/L,每 1 g 葡萄藤的氢氧化钠用量为

20 mL,搅拌均匀,在 70℃ 下改性 70 min;以甲醛改性葡萄藤,最适的改性条件为:在每 1 g 葡萄藤中加甲醛 5 mL 和 20 mL 0.1 mol/L 的硫酸溶液,摇匀,在 60℃ 下改性 4 h。将改性好的葡萄藤用蒸馏水洗至 pH>5,在 65℃ 下烘干。分别称取 3 种改性葡萄藤 1.0 g,加 100 mg/L 的次甲基蓝溶液 50 mL,pH 值为所配制次甲基蓝溶液的初试 pH 值,在 25℃ 下震荡吸附 1 h,测得硫酸、氢氧化钠及甲醛改性葡萄藤的吸附率分别为 86.50%、98.68%、84.05%,NaOH 改性后的葡萄藤对次甲基蓝的吸附效果最好,故本研究选择 NaOH 为改性剂来制备改性葡萄藤吸附剂,用于吸附次甲基蓝,未改性葡萄藤呈黄色,有部分极细颗粒,在水溶液中处于悬浮状态;经改性后呈褐色,极细颗粒减少,颗粒之间呈丝状连接,具有网捕作用,更有利于吸附,且容易和吸附后的溶液分离。

2 结果与分析

2.1 改性葡萄藤对次甲基蓝的吸附研究

2.1.1 吸附时间对吸附率的影响 取 100 mg/L 的次甲基蓝溶液 50 mL,pH 值为所配制次甲基蓝溶液的初始 pH 值(经测定 pH=6.82),改性葡萄藤用量为 0.5 g,温度控在 25℃,考察吸附时间对吸附率的影响(图 1)。

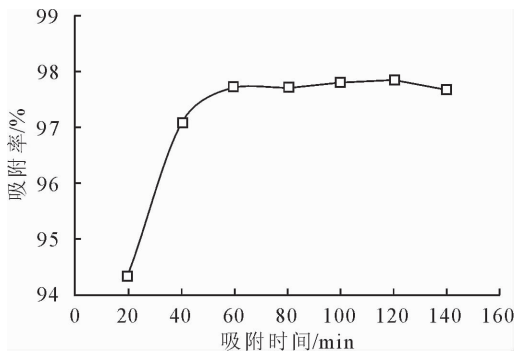


图 1 吸附时间对吸附率的影响

Fig.1 Influence of adsorption time on MB removal

吸附过程在 0~60 min 这个阶段,随着吸附时间的延长吸附率快速升高,吸附进行 60 min 后再延长吸附时间,吸附率基本保持不变,说明吸附基本达到平衡。吸附 60 min 时吸附率达到 97.7%,在初始阶段,溶液中次甲基蓝的浓度较高,次甲基蓝被较快的吸附在吸附剂表面,随着吸附的进行在 60 min 后,溶液中次甲基蓝的浓度变小,葡萄藤表面的次甲基蓝浓度升高,界面两侧浓度差减小,到达吸附剂表面的推动力减小,故吸附变缓,吸附率趋于稳定。

2.1.2 吸附剂用量对吸附率的影响 其他试验条件同 2.1.1,固定吸附时间为 60 min,考察吸附剂用

量对吸附率的影响(图2)。

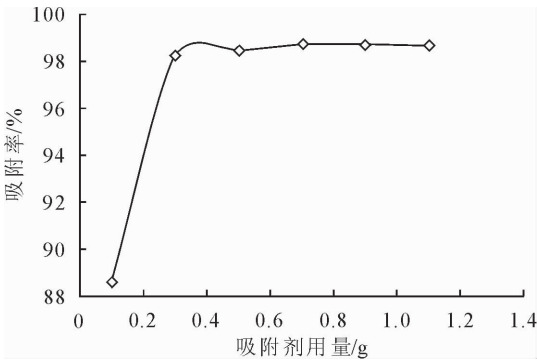


图2 吸附剂用量对吸附率的影响

Fig. 2 Influence of dosage of adsorbent on MB removal

随着吸附剂用量的增加,次甲基蓝的吸附率不断提高。在吸附剂用量由0.1 g增加到0.3 g的这个过程中,吸附率提高很快,这是因为吸附剂用量的增加,同时也增大了吸附的表面积和增加了吸附位点的数目。在用量为0.3 g以上时,吸附率增加的幅度变缓趋于稳定,为保障吸附充分彻底,本试验选取吸附剂用量为0.5 g。

2.1.3 次甲基蓝初始浓度对吸附率的影响 其他实验条件同2.1.1,固定吸附时间为60 min,吸附剂用量为0.5 g,在试验控制温度下改变次甲基蓝溶液的初始浓度,考察其对吸附率及吸附量的影响(图3、图4)。

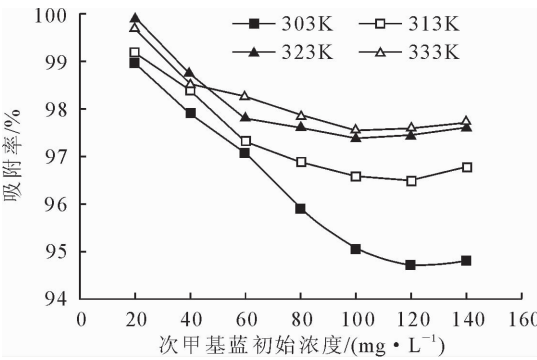


图3 次甲基蓝初始浓度对吸附率的影响

Fig. 3 Influence of MB concentration on MB removal

随次甲基蓝溶液初始浓度的增大,改性葡萄藤的吸附率逐渐降低,而吸附量在逐渐增加,和其他学者有类似的研究结果^[25-26]。在吸附剂用量一定时,所能提供的吸附位点数是一定的,次甲基蓝溶液浓度增大,使得溶液中未被吸附的次甲基蓝的浓度也增大,导致吸附率会下降,但界面两侧浓度差增大,到达吸附剂表面的推动力增大,对吸附过程产生向右移动的促进作用,故吸附剂的吸附量会增大。次甲基蓝初始浓度为100 mg/L时,吸附率也可达95%,比相关的研究结果吸附率85%高一些^[27]。

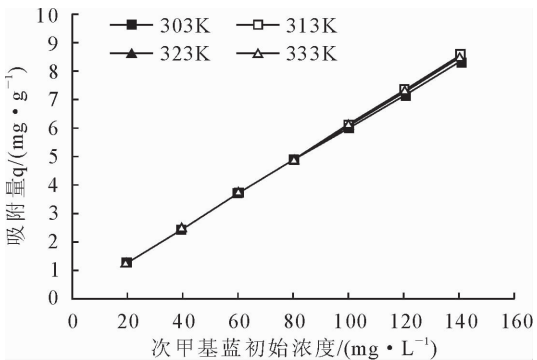


图4 次甲基蓝初始浓度对吸附量的影响

Fig. 4 Influence of MB concentration on adsorbing capacity

2.1.4 吸附质溶液pH值对吸附率的影响 其他试验条件同2.1.1,固定吸附时间为60 min,吸附剂的用量为0.5 g,改变次甲基蓝溶液的pH值,考察pH值对吸附率的影响(图5)。

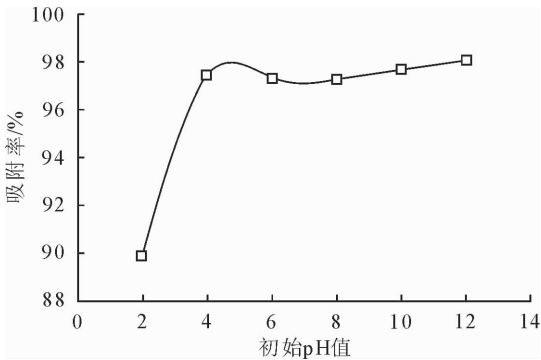


图5 初始pH值对吸附率的影响

Fig. 5 Influence of pH of MB solution on MB removal

在pH=2.0~4.0范围内,改性葡萄藤对次甲基蓝的吸附率从89.86%升高到97.41%,在pH>4.0范围内,吸附率变化不明显,可见在弱酸及碱性条件下有利于吸附剂的吸附。次甲基蓝为碱性阳离子型染料,在水中可离解为带正电的染料阳离子,相关研究得出^[20,28],改性生物质吸附剂其表面电性随溶液pH的变化而发生改变,在pH较低时,有大量H⁺存在,可能会使改性的生物质吸附剂中酚羟基和羧基离解困难,苯氧阴离子和羧酸根阴离子较少,与染料阳离子结合的静电引力较弱,吸附率会较低;当pH达弱酸至碱性条件时,则情况反之,吸附率增大,能很好解释本试验的结果。

试验结果表明,改性葡萄藤对次甲基蓝的吸附与溶液的pH值密切相关,在pH>4.0时都能获得理想的吸附效果,自然条件下所配制次甲基蓝溶液的pH值经测定为6.82,故本试验除了探讨pH对吸附的影响外,其他试验均在pH为6.82下进行。

2.2 吸附热力学分析

2.2.1 吸附等温线与吸附等温方程的确定 为了

进一步探讨吸附过程的规律,常使用 Langmuir 和 Freundlich 方程模型来描述固-液吸附等温线,方程模型分别为^[19,29]:

$$\frac{C_e}{q_e}=\frac{1}{k_lq_m}+\frac{C_e}{q_m}$$

(1)

$$\ln q_e=\ln k_f+\frac{1}{n}\ln C_e$$

(2)

式中, q_e 、 q_m 分别为平衡吸附量(mg/g)和饱和吸附量(mg/g); C_e 为吸附平衡浓度(mg/L); k_l 为 Langmuir 常数; k_f 为 Freundlich 平衡吸附常数; $1/n$ 是组分因数,反应了吸附的难易。

对试验 2.1.3 的数据进一步分析,用 Langmuir 和 Freundlich 吸附等温线方程对数据进行拟合,结果如表 1 所示。

Freundlich 方程模型在 4 个试验温度下拟合的相关系数 R^2 (0.997 5、0.995 8、0.936 8、0.985 6)都比 Langmuir(0.939 8、0.910 7、0.601 1、0.853 0)的大,且接近于 1,说明 NaOH 改性葡萄藤对次甲基蓝

的吸附规律更符合 Freundlich 方程所描述的规律,属于多分子层吸附。因为 $0.1<1/n<1$,表明在试验温度范围内,NaOH 改性葡萄藤有利于次甲基蓝的吸附,属于优惠吸附过程。Freundlich 常数随着温度的升高逐渐增大,表明该吸附反应为吸热反应,升高温度有利于改性葡萄藤对次甲基蓝的吸附。

2.2.2 吸附热力学性质 吸附过程中的标准吉布斯自由能 ΔG 可以用式(1)计算:

$$\Delta G=-RT\ln k$$

(3)

式中, k 为吸附平衡常数(k 为 Freundlich 方程中的参数), T 为热力学温度,吸附过程的标准焐变 ΔH 和标准熵变 ΔS 可根据 Van't Hoff 方程(2)求出:

$$\ln k=\frac{\Delta S}{R}-\frac{\Delta H}{R}\frac{1}{T}$$

(4)

将 $\ln k$ 对 $1/T$ 拟合所得线性方程为 $y=7.320-1.976.72x$,根据直线的斜率和截距可计算出吸附过程的 ΔH 和 ΔS (表 2)。

表 1 不同温度下吸附等温线拟合结果

Table 1 Constants of Langmuir and Freundlich adsorption isothermal equations at different temperatures

T(K)	Langmuir			Freundlich		
	$q_m/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	$k_l/(\text{L}\cdot\text{mg}^{-1})$	R^2	k_f	$1/n$	R^2
303	15.11	0.145 9	0.939 8	2.161	0.654 4	0.997 5
313	15.18	0.207 9	0.910 7	2.767	0.642 7	0.995 8
323	15.57	0.279 8	0.601 1	3.501	0.627 4	0.936 8
333	14.47	0.363 3	0.853 0	3.826	0.610 5	0.985 6

表 2 改性葡萄藤吸附次甲基蓝的热力学参数

Table 2 Thermodynamic parameters for adsorption of MB by modified grape stalks

T(K)	ΔG /(kJ·mol ⁻¹)	ΔH /(kJ·mol ⁻¹)	ΔS /(J·mol ⁻¹ ·K)
303	-1.94	16.43	60.86
313	-2.65		
323	-3.36		
333	-3.71		

4 个试验温度条件下的 ΔG 都为负值,表明改性葡萄藤对次甲基蓝的吸附过程是自发的,且温度越高, ΔG 越小,吸附剂吸附次甲基蓝的驱动力越强;计算所得 ΔH 为正值,表明该吸附过程是吸热反应,和 Freundlich 等温方程的结论一致,升高温度有利于吸附的进行,故改性葡萄藤对次甲基蓝的吸附率会随着温度的升高而增加; ΔS 为正值,说明改性葡萄藤对次甲基蓝吸附的自发性随温度的升高会增大,吸附是熵驱动过程。

2.3 吸附动力学分析

2.3.1 吸附动力学方程的确定 吸附动力学特征用拟一级速率方程、拟二级速率方程和内扩散速率

方程进行描述^[29-30]:

$$\lg(q_e-q_t)=\lg q_e-\frac{K_1t}{2.303}$$

(5)

$$\frac{t}{q_t}=\frac{1}{k_2q_e^2}+\frac{t}{q_e}$$

(6)

$$q_t=k_it^{0.5}$$

(7)

式中, q_t 、 q_e 分别为 t 时刻和平衡时的吸附量(mg/g); k_1 、 k_2 分别为拟一级速率常数(min⁻¹)和拟二级速率常数(g·mg⁻¹·min⁻¹); k_i 为内扩散速率常数(mg·g⁻¹·min^{-0.5})。

试验条件同 2.2.1,将吸附量 q (mg/g)对吸附时间 t (min)用拟一级速率方程、拟二级速率方程和内扩散速率方程进行拟合,结果列于表 3。在 4 个不同试验温度下,用拟二级速率方程拟合的 R^2 均达到 1.000,说明本试验结果使用拟二级速率方程表征更为适宜。

将 $t=60$ min 代入所求拟二级速率方程中可求得温度在 303、313、323 K 和 333 K 时的吸附量分别为 9.50、9.56、9.61 mg/g 和 9.63 mg/g(是相关研究吸附量的 2 倍^[31]),与表 3 中所求各温度下的平衡吸附量相差不大,说明改性葡萄藤吸附次甲基蓝

60 min 以后基本达到平衡,与试验所得结果一致。

2.3.2 活化能的确定 根据 Arrhenius 公式 $\ln k = -E_a/RT + \ln A$ (R 为气体常数, k 为吸附速率常数, 本文取拟二级速率常数 k_2), 以 $\ln k$ 对 $1/T$ 进行数

据拟合,得方程: $y = 8.911 - 3\,349.72x$, 计算得 E_a 为 27.85 kJ/mol, 表明吸附剂吸附次甲基蓝是吸热过程, 与所求焓变 ΔH 的结果一致。

表3 改性葡萄藤吸附次甲基蓝的动力学曲线拟合结果

Table 3 Constants of adsorption of MB kinetic equations by modified grape stalks

T(K)	拟一级速率方程			拟二级速率方程			内扩散速率方程	
	q_e /(mg·g ⁻¹)	k_t /(min ⁻¹)	R^2	q_e /(mg·g ⁻¹)	k_2 /(g·mg ⁻¹ ·min ⁻¹)	R^2	k_i /(mg·g ⁻¹ ·min ^{-0.5})	R^2
303	9.63	0.885 4	0.948 8	9.64	0.112 6	1.000	0.044 7	0.850 4
313	9.65	0.546 3	0.982 8	9.66	0.162 6	1.000	0.028 2	0.889 4
323	9.67	0.404 3	0.928 9	9.67	0.278 4	1.000	0.019 5	0.720 3
333	9.69	0.385 7	0.984 8	9.69	0.282 5	1.000	0.019 1	0.803 0

3 结论

本试验选用 NaOH 为改性剂,制备改性葡萄藤吸附剂,对次甲基蓝的吸附效果较好,并研究改性后的葡萄藤对次甲基蓝的吸附性能。

NaOH 改性葡萄藤吸附次甲基蓝的最佳试验条件为:室温下处理 100 mg/L 的次甲基蓝溶液 50 mL,改性葡萄藤用量为 0.5 g,在 pH 值>4.0(本研究是在 6.8 下进行的)的条件下振荡吸附 60 min, 吸附率可达 97.7%。

NaOH 改性葡萄藤对次甲基蓝的吸附规律符合 Freundlich 方程所描述的规律,属于多分子层吸附,为优惠吸附过程;热力学参数吉布斯自由能变 $\Delta G < 0$, 焓变 ΔH 为 16.43 kJ/mol, 熵变 ΔS 为 60.86 J/mol·K, 吸附过程符合拟二级动力学模型,活化能 E_a 为 27.85 kJ/mol, 吸附是自发的、吸热的熵驱动过程。

参考文献:

[1] GEORGIOU D, AIVAZIDIS A, HATIRAS J, *et al.* Treatment of cotton textile wastewater using lime and ferrous sulfate[J]. Water Research, 2003, 37(9): 2248-2250.

[2] SZYGULA A, GUIBAL E, PALACIN M A, *et al.* Removal of an anionic dye (Acid Blue 92) by coagulation-flocculation using chitosan[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(10): 2979-2986.

[3] KANG Q, GAO B Y, YUE Q Y, *et al.* Residual color profiles of reactive dyes mixture during a chemical flocculation process [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2007, 299(1-3): 45-53.

[4] JONSTRUP M, PUNZI M, MATTIASSON B. Comparison of anaerobic pretreatment and aerobic post-treatment coupled to photo-fenton oxidation for degradation of azo dyes [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 2011, 224(1): 55-61.

[5] KHATAEE A R, ZAREI M, MORADKHANNEJHAD L. Ap-

plication of response surface methodology for optimization of azo dye removal by oxalate catalyzed photoelectron-fenton process using carbon nanotube-PTFE cathode [J]. Desalination, 2010, 258(1-3): 112-119.

[6] GUPTA V K, JAIN R, AGARWAL S, *et al.* Photodegradation of hazardous dye quinoline yellow catalyzed by TiCO₂ [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2012, 366(1): 135-140.

[7] KRISHNAKUMAR B, SWAMINATHAN M. Influence of operational parameters on photocatalytic degradation of a genotoxic azo dye acid violet 7 in aqueous ZnO suspensions [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2011, 81(1): 739-744.

[8] MMLIK P K, SAHA S K. Oxidation of direct dyes with hydrogen peroxide using ferrous ion as catalyst [J]. Sep. Purif Technol, 2003, 31: 241-250.

[9] KOCH M, YEDILERA, LIENERT D, *et al.* Ozonation of hydrolyzed azo dye reactive yellow 84 (Cl) [J]. Chernosphere, 2002, 46: 109-113.

[10] 郑祥, 刘俊新. 厌氧反应器与好氧 MBR 组合工艺处理毛纺印染废水试验研究[J]. 环境科学, 2004, 25(5): 102-105.

ZHENG X, LIU J X. Printing and dyeing wastewater treatment using combined process of anaerobic bioreactor and MBR [J]. Environmental Science, 2004, 25(5): 102-105. (in Chinese)

[11] LOPES C N, PETRUS J C C, RIELLA H G. Color and COD retention by nanofiltration membranes [J]. Desalination, 2005, 172(1): 77-83.

[12] TANG C, CHEN V. Nanofiltration of textile wastewater for water reuse [J]. Desalination, 2002, 143(1): 11-20.

[13] CIARDELLI G, CORSI L, MARUCCI M. Membrane separation for wastewater reuse in the textile industry [J]. Resource Conserv Recy, 2000, 31: 189-197.

[14] KARAGOZ S, TAY T, UCAR S, *et al.* Activated carbons from waste biomass by sulfuric acid activation and their use on methylene blue adsorption [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(14): 6214-6222.

[15] AL-DEGS Y S, KHRAISHEH M, ALLEN S J, *et al.* Adsorption characteristics of reactive dyes in columns of activated carbon [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 165(1-3):

944-949.

[16] HAMEED B H, AHMAD A L, LATIFF K N A. Adsorption of basic dye (methyleneblue) onto Activated carbon prepared from rattan sawdust [J]. Dyes and Pigments, 2007, 75: 143-149.

[17] GRAG V K, GUPTA R, YADAV A B, *et al.* Dye removal from aqueous solution by adsorption on treated sawdust [J]. Bioresource Technology, 2003, 89: 121-124.

[18] SONAWANE G H, SHRIVASTAVA V S. Kinetics of decolorization of malachite green from aqueous medium by maize cob (*Zea mays*): an agricultural solid waste[J]. Desalination, 2009, 247 (1-3): 430-441.

[19] 廖钦洪, 刘庆业, 蒙冕武, 等. 稻壳基活性炭的制备及其对亚甲基蓝吸附的研究 [J]. 环境工程学报, 2011, 5 (11): 2447-2452.

[20] 张文轩. 改性秸秆对污水中染料物质的吸附脱除研究[D]. 南京: 南京大学, 2012.

[21] KUMAR P S, RAMALINGAM S, SENTHAMARAI C, *et al.* Adsorption of dye from aqueous solution by cashew nut shell: studies on equilibrium isotherm, kinetics and thermodynamics of interactions[J]. Desalination, 2010, 261(1-2): 52-60.

[22] 邢占赢. 改性松针对染料的吸附研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2011.

[23] TANYILDIZI M S. Modeling of adsorption isotherms and kinetics of reactive dye from aqueous solution by peanut hull [J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 168(3): 1234-1240.

[24] KHAN M M R, RAY M, GUHA A K. Mechanistic studies on the binding of acid yellow 99 on coir pith[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(3): 2394-2399.

[25] BATZIAS F, SIDIRAS D, SCHROEDER E, *et al.* Simulation of dye adsorption on hydrolyzed wheat straw in batch and fixed-bed systems [J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 148(2-3): 459-472.

[26] GONG R M, ZHONG K D, HU Y, *et al.* Thermochemical esterifying citric acid onto lignocellulose for enhancing methylene blue sorption capacity of rice straw[J]. Journal of Environmental Management, 2008, 88(4): 875-880.

[27] 杨超, 蔡亚非, 龚仁敏, 等. 葛苳皮生物材料吸附水溶液中阳离子染料的研究[J]. 南京农业大学学报, 2006, 29(2): 45-49.

YANG C, CAI Y F, GONG R M, *et al.* Removal of cationic dyes from aqueous solution by biosorption on lettuce peel[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2006, 29(2): 45-49. (in Chinese)

[28] 李山. 改性花生壳对水中重金属离子和染料的吸附特性研究[D]. 西安: 西北大学, 2009.

[29] 汪洋, 吴纓. 改性油菜秸秆对 Co(II) 的吸附[J]. 环境工程学报, 2016, 10(1): 379-384.

[30] 李红萍, 刘利娥, 韩秀丽, 等. 改性松针对水体中铅(II) 的吸附[J]. 环境工程学报, 2014, 8(9): 3755-3760.

[31] HAN R P, WANG Y F, YU W H, *et al.* Biosorption of methylene blue from aqueous solution by rice husk in a fixed-bed column[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 141(3): 713-718.

.....

(上接第 170 页)

[25] 周朝彬, 宋于洋, 王炳举, 等. 干旱胁迫对胡杨光合和叶绿素荧光参数的影响[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(4): 5-9.

ZHOU C B, SONG Y Y, WANG B J, *et al.* Effects of drought stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of *Populus euphratica* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(4): 5-9. (in Chinese)

[26] 赵昕, 宋瑞清, 阎秀峰. 接种 AM 真菌对喜树幼苗生长及光合特性的影响[J]. 植物生态学报, 2009, 33(4): 783-790

ZHAO X, SONG R Q, YAN X F. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on growth and photosynthesis of *Camptotheca acuminata* seedlings [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33(4): 783-790. (in Chinese)

[27] SOLEIMANZADEH H, HABIBI D, ARDAKANI M, *et al.* Effect of potassium levels on antioxidant enzymes and malondialdehyde content under drought stress in sunflower (*Helianthus annuus* L.) [J]. American Journal of Agricultural and Biological Science, 2010: 56-61.

[28] 孙业民, 张俊莲, 李真, 等. 氯化钾对于干旱胁迫下马铃薯幼苗抗旱性的影响及其机制研究[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(3): 29-34.

SUN Y M, ZHANG J L, LI Z, *et al.* Effects of potassium chloride on drought resistance of potato seedlings [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(3): 29-34. (in Chinese)

[29] OOSTERHUIS D M, LOKA D A, KAWAKAMI E M, *et al.* The physiology of potassium in crop production [J]. Advances in Agronomy, 2014, 126: 203-233.

[30] BENHIBA L, FOUAD M O, ESSAHIBI A, *et al.* Arbuscular mycorrhizal symbiosis enhanced growth and antioxidant metabolism in date palm subjected to long-term drought [J]. Trees, 2015, 29: 1-9.