

# 改性花生壳和木屑对水中活性艳红的吸附研究

廖颖敏, 刘辉峡, 詹子婷, 黄嘉达, 余明翔

(厦门大学 嘉庚学院 环境科学与工程系, 福建 漳州 363105)

**摘要:** 用经过磷酸改性的花生壳和木屑制成混合吸附剂对水中活性艳红 K-2BP 进行吸附研究, 通过静态试验系统地考察了混合吸附剂中改性花生壳和木屑的质量比、混合吸附剂的投加量、pH、温度和振荡速率等重要因素对 K-2BP 吸附效果的影响, 并对吸附机理进行了探讨。研究表明: 改性花生壳和木屑对 10 mg/L K-2BP 吸附的最佳条件为: 改性花生壳和木屑的质量比 1: 3.5, 混合吸附剂的投加量 0.9 g, 温度 328 K, pH 值 14, 振荡速率 120 r/min, 水中 K-2BP 的去除率可达 98.6%, 影响因素中 pH 值的影响最大。Langmuir 吸附模型和伪二级动力学模型能较好地描述混合吸附剂对水中 K-2BP 的吸附过程, 理论的最大吸附量为 10.83 mg/g, 吸附过程为吸热反应, 可自发进行, 因此改性花生壳和木屑吸附 K-2BP 技术在实际污染处理中具有良好的应用前景。

**关键词:** 磷酸改性; 花生壳; 木屑; 吸附; 活性艳红; 印染废水处理

中图分类号: X703.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)03-0014-06

## Study on adsorption of reactive brilliant red in water by modified peanut shell and sawdust

LIAO Yingmin, LIU Huixia, ZHAN Ziting, HUANG Jiada, YU Mingxiang

(Department of Environmental Science and Engineering, Tan Kah Kee College, Xiamen University, Fujian 363105, China)

**Abstract:** The paper studied the adsorption of reactive brilliant red K-2BP by peanut shell and sawdust modified by phosphoric acid. The influence of the important factors such as the mass ratio of modified peanut shells and sawdust, dosage of mixed adsorbent, pH value, reaction temperature and oscillation rate on adsorption effect was systematically examined through static experiment. It also studied the adsorption mechanism. The results showed that the optimal conditions of adsorption are that the mass ratio of modified peanut shells and sawdust is 1: 3.5, the dosage of mixed adsorbent is 0.9 g, the reaction temperature is 328 K, the pH is 14, and the oscillation rate is 120 r/min. The removal efficiency of K-2BP reaches 98.6%. The most impact factor pH. The adsorption process of K-2BP by mixed adsorbent in water accorded with Langmuir mode and fitted well with pseudo second-order model. The maximum amount of theoretical adsorption is 10.83 mg/g. The adsorption process is endothermic and spontaneous. Overall, the adsorption technology of K-2BP by modified peanut shells and sawdust has good application prospect in treatment of pollutant.

**Key words:** phosphoric acid modification; peanut shell; sawdust; adsorption; reactive brilliant red; dyeing waster water treatment

## 1 研究背景

一方面, 中国是世界花生生产大国, 年产花生近 1500 万 t, 副产品花生壳约 500 万 t<sup>[1]</sup>。这些花生壳目前少量被用于热能、食品、化工和医药等领域的研

究<sup>[2]</sup>, 部分被用作饲料和燃料外, 大部分被丢弃。作为燃料, 会产生大量浓烟和飞尘。堆积如山的木屑, 不仅占用了大量的土地, 且细小的木屑颗粒物增加了空气中的灰尘量使空气中的 PM10 和 PM2.5 增大。这些都对人类健康造成危害。

收稿日期: 2014-12-18; 修回日期: 2015-04-09

基金项目: 2014 年福建省中青年骨干教师教育科研项目(科技 A 类, 杰青)(JA14350); 福建省教育厅科技研究 A 类项目(JA12371)

作者简介: 廖颖敏(1979-), 女, 福建厦门人, 博士, 副教授, 研究方向: 水处理技术。

另一方面,染料废水因其成分复杂、色度深、有机污染物含量高、可生化性差、难降解且大多数染料及其代谢中间产物具有致突变性、致癌性和其他毒性<sup>[3]</sup>。因化纤织物的发展和印染后整理技术的进步,使PVA浆料、新型助剂等难以生化降解的有机物大量进入印染废水,增加了处理难度。

当前用于印染废水处理的方法有生物处理法、化学氧化法、絮凝沉淀法、吸附法、光催化降解法等<sup>[4]</sup>。相对于其他处理方法,吸附法凭借其治理费用低廉,操作性强,易于设计运行,对有毒污染物不敏感及不产生二次污染物等优点,成为目前极具发展潜力的除去废水中难生物降解污染物的一个有效方法<sup>[5]</sup>。大量研究证明了花生壳和木屑都具有较强的捕获重金属的能力<sup>[6-7]</sup>。

基于此,如能将花生壳和木屑这类废弃物运用于对印染废水的脱色处理,则可达到以废治污,提高其利用价值。本文将花生壳和木屑通过改性混合制成混合吸附剂,并重点探究对有机染料活性艳红的吸附条件、吸附动力学和吸附热力学分析,可为农业废弃物为原料的吸附剂研制开发提供一定的理论基础。

## 2 材料与方法

### 2.1 实验材料与试剂

花生壳取自漳州东山岛、木屑取自石狮市某家具厂,粉碎至50~300目备用。准确称取干燥的活性艳红K-2BP(简称K-2BP),配制不同浓度的K-2BP。实验所用药品均为分析纯,实验用水为超纯水。紫外-可见分光光度计(ZWKJ-02,上海光谱仪器有限公司)、台式恒温振荡器(THZ-312,上海精宏实验设备有限公司)、台式离心机(TDL80-2B,广东海利集团有限公司)、马弗炉(SX-4-10,厦门柯隆化玻器材有限公司)、电热恒温鼓风干燥箱(DHG-9140A,上海精宏)、pH计(STARTER 3100,奥豪斯仪器(上海)有限公司)、高速多功能粉碎机(JP-350A-8型,上海冰都电器有限公司)。

### 2.2 吸附剂改性方法

称取5g花生壳置于1L的烧杯中,加入100mL浓度为1mol/L的磷酸溶液,搅拌60min后,抽滤去除液体部分,323K下烘干,然后升温至453K后加热60min<sup>[8]</sup>,用348K去离子水清洗去除游离的磷酸,再于马弗炉中773K活化60min,然后在323K下烘干备用。

称取5g木屑置于1L烧杯中,磷酸与木屑按2:1混合,搅拌均匀后静置5min使其充分浸渍溶胀,

再放置于393~423K烘箱中干燥固化60min,期间每隔15min搅拌一次。然后置于马弗炉中于773K下活化60min,活化结束后先酸洗,后水洗直至漂洗液呈中性,后放置于干燥箱中323K干燥备用<sup>[9]</sup>。

### 2.3 分析与计算方法

往100mL K-2BP溶液中加入一定量的改性吸附剂,在不同温度下用不同转速振荡一定时间,静置,取上清液,在3000r/min下离心分离后,采用紫外-可见分光光度法在波长为534nm下测定其吸光度。经测定K-2BP浓度的标准曲线为: $A = 0.0151C + 0.0147$ ,  $R^2 = 0.9998$ 。

K-2BP的去除率公式:

$$\eta = (A_0 - A) / A_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中: $A_0$ 为吸附前K-2BP吸光度; $A$ 为吸附后K-2BP吸光度。

K-2BP的吸附量公式:

$$q_t = (C_0 - C_e) V / m \quad (2)$$

式中: $C_0$ 、 $C_e$ 为吸附前及吸附平衡时溶液中K-2BP的浓度,mg/L; $q_t$ 为吸附 $t$ 时间吸附剂对溶液中K-2BP的吸附量,mg/g; $V$ 为K-2BP溶液的体积,L; $m$ 为吸附剂质量,g。

## 3 结果与讨论

### 3.1 花生壳和木屑质量比对K-2BP的吸附影响

将改性后的花生壳与木屑按质量比1:0.5、1:1、1:1.5、1:2、1:2.5、1:3、1:3.5和1:4比例混合,取混合吸附剂0.5g投入到100mL 10mg/L的K-2BP溶液中,于振荡速率180r/min、温度333K的条件下振荡240min。由图1可知,当质量比为1:3.5时去除率最高,因而以下实验中改性后的花生壳与木屑的质量比均采用最佳比值1:3.5。

### 3.2 投加量对K-2BP的吸附影响

取花生壳和木屑混合吸附剂0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0g,分别投入到100mL 10mg/L的K-2BP溶液中,于振荡速率180r/min、温度333K的条件下振荡240min。由图2可知,K-2BP的去除率随着混合吸附剂投加量的增加逐渐上升,并在投加量达到0.8g时趋于稳定。说明该条件下,混合吸附剂的最适投加量为0.8g。

### 3.3 温度对K-2BP的吸附影响

取0.5g的混合吸附剂投入到100mL浓度为10mg/L的K-2BP溶液中,在温度为303、313、323、333、343K条件下,以振荡速率180r/min振荡240min。由图3可知,在303~313K时,K-2BP

的去除率略有下降,但之后随温度升高,K-2BP 的去除率呈上升趋势,并在 343 K 时达到最高。通常将吸附作用分为物理吸附和化学吸附,其中化学吸附需要一定的活化能。当溶液温度升高时,有利于化学吸附克服活化能的障碍,增强离子内扩散速率,从而提高吸附去除率<sup>[10]</sup>,说明混合吸附剂对 K-2BP 的吸附是吸热过程。

### 3.4 振荡速率对 K-2BP 的吸附影响

取 0.5 g 的混合吸附剂投入到 100 mL 浓度为

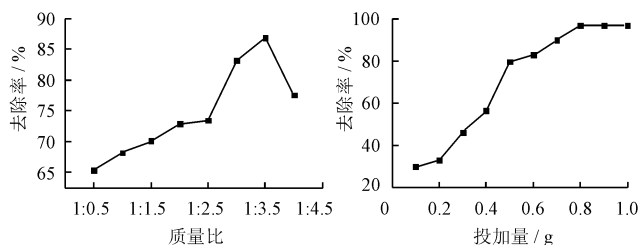


图1 花生壳和木屑的质量比对 K-2BP 的去除效果的影响

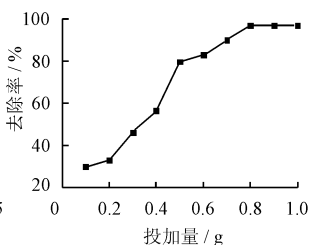


图2 投加量对 K-2BP 的去除效果的影响

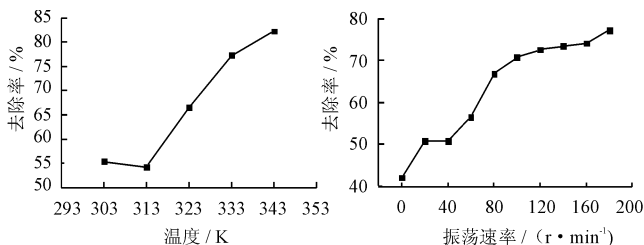


图3 温度对 K-2BP 的去除效果的影响

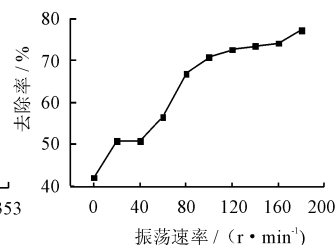


图4 振荡速率对 K-2BP 的去除效果的影响

### 3.5 pH 对 K-2BP 的吸附影响

利用 HCl 溶液和 NaOH 溶液将 100 mL 浓度为 10 mg/L 的 K-2BP 溶液的 pH 值调节至 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、12、13 和 14,取 0.5 g 的混合吸附剂投入到不同 pH 值的 K-2BP 溶液中,于振荡速率 180 r/min、温度 333 K 的条件下振荡 240 min。由图 5 可知,K-2BP 的去除率随着溶液 pH 值的升高基本呈现一个先下降后升高的趋势,在 pH 为 12 时为最低,这与不同 pH 值下 K-2BP 在水溶液中的离解性有关。在强酸性条件下,K-2BP 中的磺酸基获得质子后,疏水性增大,染料分子更易扩散到气液界面,增强染料分子活性,提高吸附效率。而在强碱性的条件下,染料分子以盐的形式存在,-OH 可能使吸附剂表面物质发生变化,而增加吸附能力,从而提高去除率。

### 3.6 正交试验

为了获得混合吸附剂对 K-2BP 吸附的最佳效果,并衡量各因素对吸附的影响程度,同时考虑到节能减排的环保理念,用  $L_9(3^4)$  正交表进行试验,选取了 4 个因素和 12 个水平,分别是混合吸附剂的投加量为 0.7、0.8、0.9 g、温度为 298、313、328 K、pH 为 12、13、14 和振荡速率为 100、110、120 r/min。

对 10 mg/L 的 K-2BP 溶液进行正交试验分别处理 240 min 后,结果如表 1 所示。该吸附反应的最佳条件为:混合吸附剂的投加量 0.9 g,温度 328 K,pH 值 14,振荡速率 120 r/min,此时 K-2BP 的去

10 mg/L 的 K-2BP 溶液中,在温度 333 K、振荡速率分别为 0、20、40、60、80、100、120、140、160、180 r/min 的条件下振荡 240 min。

由图 4 可知,随着振荡速率的上升,K-2BP 的去除率逐渐升高,当达到 180 r/min 时去除率达到最高。究其原因因为吸附初始阶段以膜扩散为主,所以随着振荡速率的增加,K-2BP 分子与混合吸附剂的碰撞几率增加,与吸附剂表面的接触概率增大,从而提高了吸附效果。

除率可达 98.6%。从极差大小发现各因素对 K-2BP 去除效果的影响从大到小分别是 pH 值、混合吸附剂的投加量、温度、振荡速率,可见 pH 值对混合吸附剂去除水中 K-2BP 的影响最大。

表 1 正交试验结果 g, K, r/min, %

实验	投加量	温度	pH	振荡速率	去除率
1	0.7	298	12	100	28.0
2	0.7	313	13	110	65.6
3	0.7	328	14	120	93.6
4	0.8	298	13	120	97.6
5	0.8	313	14	100	92.0
6	0.8	328	12	110	60.0
7	0.9	298	14	110	97.0
8	0.9	313	12	120	58.2
9	0.9	328	13	100	97.6
均值	62.4	74.2	48.7	72.5	
均值	83.2	71.9	86.9	74.2	
均值	84.3	83.7	94.2	83.1	
极差	21.9	11.8	45.5	10.6	

### 3.7 等温吸附

投加 0.8 g 混合吸附剂于 pH 值为 13,初始浓度分别为 20、30、40、50、60 mg/L 的 K-2BP 溶液中,在温度 298、313、328 K,振荡速率 100 r/min 条件下进行吸附处理,待吸附达到平衡时,固液分离并

计算得到溶液中 K-2BP 的浓度和吸附量,并采用吸附等温模型来描述二者之间的关系。

最为普遍用来描述的两种吸附等温模型为 Langmuir 等温吸附方程和 Freundlich 等温吸附方程。Langmuir 等温线是应用最为广泛的吸附模型,可以在较宽的浓度范围内很好地描述实验数据。方程的线性形式如下:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_{\max}} + \frac{1}{q_{\max}k_L} \quad (3)$$

式中:  $q_{\max}$  为吸附剂的最大吸附量, mg/g;  $C_e$  为吸附平衡时溶液中 K-2BP 的浓度, mg/L;  $q_e$  为吸附平衡时吸附剂对溶液中 K-2BP 的吸附量, mg/g;  $k_L$  是 Langmuir 吸附平衡常数<sup>[11]</sup>。以  $C_e/q_e$  为纵坐标对  $C_e$  作图,通过斜率和截距的计算可以得到  $q_{\max}$  和  $k_L$  的参数值,结果如图 6(a) 和表 2 所示。

此外,其结果还可通过一个单独参数  $R_L$  来衡

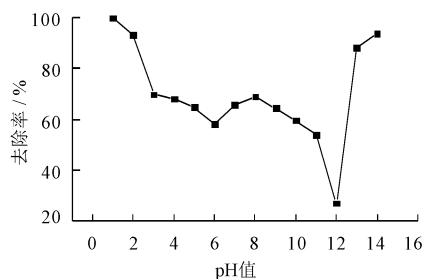


图5 pH对K-2BP的去除效果的影响

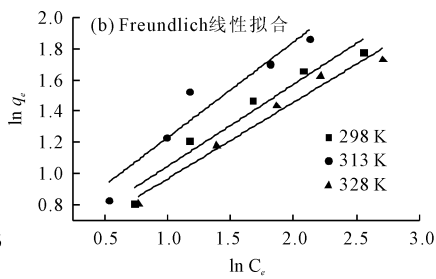
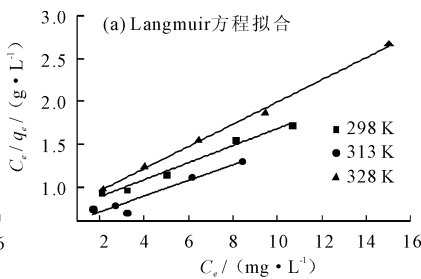


图6 混合吸附剂对K-2BP吸附的线性拟合

表2 混合吸附剂对K-2BP吸附的Langmuir和Freundlich方程相关参数

混合吸附剂	温度	Langmuir				Freundlich			K, mg/g
		$q_{\max}$	$k_L$	$R^2$	$R_L$	$n$	$k_f$	$R^2$	
改性花	298	10.01	0.15	0.9763	0.1	1.90	1.68	0.9333	
生壳和	313	10.83	0.17	0.9100	0.08	1.63	1.85	0.8941	
木屑	328	7.69	0.19	0.9965	0.08	2.03	1.60	0.9650	

如果  $R_L$  值介于 0~1 之间表明该吸附过程是可取的,由表 2 中的数据可知,  $R_L$  值均小于 0.1,因此该吸附过程都是有效的。此外表 2 数据显示,相比于 Freundlich 等温吸附模型, Langmuir 等温吸附模型线性相关系数  $R^2$  较高且均大于 0.91,表明 Langmuir 等温吸附模型可以很好的描述混合吸附剂对 K-2BP 的吸附行为,吸附过程理论最大吸附量为 10.83 mg/g。

### 3.8 吸附动力学研究

投加 0.8 g 混合吸附剂于 pH 值为 13,温度为 298 K,振荡速率为 100 r/min 条件下分别处理浓度为 40、50、60 mg/L 的 K-2BP 溶液。实验数据采用

量,参数计算式如下:

$$R_L = \frac{1}{1 + k_L C_0} \quad (4)$$

式中:  $C_0$  为吸附前 K-2BP 的浓度, mg/L。

另一种广泛使用的吸附模型为 Freundlich 的方程,适用于不均一吸附剂表面的非理想吸附,其方程线性形式为:

$$\ln q_e = \ln k_f + \frac{\ln C_e}{n} \quad (5)$$

式中:  $q_e$  为吸附平衡时吸附剂对溶液中 K-2BP 的吸附量, mg/g;  $C_e$  为吸附平衡时溶液中 K-2BP 的浓度, mg/L;  $n$  是一无量纲的与吸附强度有关的系数;  $k_f$  是 Freundlich 吸附平衡常数,代表吸附能力的大小。以  $\ln q_e$  为纵坐标对  $\ln C_e$  作图,通过斜率和截距的计算可以得到  $n$  和  $k_f$  的参数值,结果如图 6(b) 和表 2 所示。

伪一级和伪二级两种动力学模型进行拟合,伪一级动力学方程可以用下式表示:

$$\lg(q_e - q_t) = \lg q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (6)$$

式中:  $q_e$  和  $q_t$  分别为吸附剂对溶液中 K-2BP 吸附平衡时和  $t$  时间的吸附量, mg/g;  $k_1$  为伪一级动力学模型的平衡速率常数,  $\text{min}^{-1}$ <sup>[12]</sup>。

以  $\lg(q_e - q_t)$  为纵坐标对  $t$  作图,通过斜率和截距的计算可以得到  $k_1$  和  $q_e$  的参数值,结果如图 7(a) 和表 3 所示。

伪二级动力学方程可以用下式表示:

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

式中:  $q_e$  和  $q_t$  分别为吸附剂对溶液中 K-2BP 吸附平衡时和  $t$  时间的吸附量,  $\text{mg/g}$ ;  $k_2$  是伪二级动力学模型的平衡速率常数,  $\text{g}/(\text{mg} \cdot \text{min})$  [13]。以  $t/q_t$  为纵坐标对  $t$  作图, 通过斜率和截距的计算可以得到  $q_e$  和  $k_2$  参数值, 结果如图 7(b) 和表 4 所示。

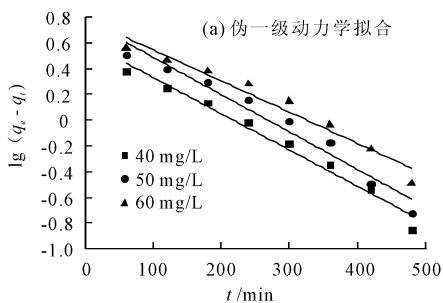


表 3 和表 4 中数据显示, 相比于伪一级动力学方程, 伪二级动力学方程拟合的相关系数  $R^2$  较大且都大于 0.96, 当 K-2BP 浓度为 40  $\text{mg/L}$  时相关系数  $R^2$  达到 0.99 以上。因此伪二级动力学模型可以更好的描述混合吸附剂吸附水中 K-2BP。

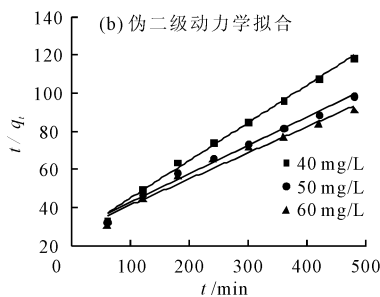


图 7 混合吸附剂对 K-2BP 吸附的动力学拟合和图

表 3 不同初始浓度 K-2BP 的伪一级动力学相关参数  
 $\text{mg/L}, \text{mg/g}, \text{min}^{-1}$

$C_0$	伪一级动力学模型	$q_e$	$k_1$	$R^2$
40	$\lg(q_e - q_t) = 0.6112 - 0.0028t$	4.08	0.0064	0.9739
50	$\lg(q_e - q_t) = 0.7771 - 0.0029t$	5.99	0.0067	0.9579
60	$\lg(q_e - q_t) = 0.7872 - 0.0024t$	6.12	0.0055	0.9523

表 4 不同初始浓度 K-2BP 的伪二级动力学相关参数  
 $\text{mg/L}, \text{mg/g}, \text{g}/(\text{mg} \cdot \text{min})$

$C_0$	伪一级动力学模型	$q_e$	$k_2$	$R^2$
40	$t/q_t = 0.1975t + 25.18$	5.06	0.0016	0.9942
50	$t/q_t = 0.1491t + 27.90$	6.71	0.0008	0.9845
60	$t/q_t = 0.1367t + 27.63$	7.32	0.0007	0.9676

### 3.9 吸附热力学

吸附过程热力学特性可以用热力学参数标准吉布斯自由能变、标准反应焓变和标准反应熵变来表征, 其与固-液分配系数 ( $q_e/C_e$ ) 之间的关系分别为 [14]:

$$\ln\left(\frac{q_e}{C_e}\right) = -\frac{\Delta H^\theta}{RT} + \frac{\Delta S^\theta}{R} \quad (8)$$

$$\Delta G^\theta = \Delta H^\theta - T\Delta S^\theta \quad (9)$$

式中:  $q_e/C_e$  为吸附分配系数;  $R$  为理想气体常数;  $T$  为绝对温度,  $\text{K}$ ;  $\Delta G^\theta$  为标准吉布斯自由能变,  $\text{kJ/mol}$ ;  $\Delta H^\theta$  为标准反应焓变,  $\text{kJ/mol}$ ;  $\Delta S^\theta$  为标准反应熵变,  $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

在温度 298、313、328  $\text{K}$  条件下, 采集混合吸附剂吸附 K-2BP 的等温吸附曲线数据, 以  $\ln(q_e/C_e)$  为纵坐标对  $T^{-1}$  作图, 通过斜率和截距的计算可以

得到式 (8) 中吸附过程的  $\Delta H^\theta$  和  $\Delta S^\theta$  的参数值, 更进一步通过式 (9) 计算得到不同温度条件下的  $\Delta G^\theta$ 。如表 5 所示,  $\Delta G^\theta$  为负值, 说明反应可自发进行; 其反应的  $\Delta H^\theta$  为正值, 说明该反应为吸热反应, 温度上升有利于反应进行。

表 5 混合吸附剂吸附 K-2BP 的热力学相关参数  
 $\text{K}, \text{kJ/mol}, \text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$

温度	$\Delta G^\theta$	$\Delta H^\theta$	$\Delta S^\theta$
298	-4.71		
313	-4.62	6.55	6.17
328	-4.53		

## 4 结 语

通过本研究可知, 以花生壳和木屑为原材料经过改性制备的混合吸附剂可以作为吸附剂吸附处理水中 K-2BP。研究结论如下:

(1) 以 10  $\text{mg/L}$  的 K-2BP 溶液进行单因素及正交试验, 得出溶液的 pH 值对混合吸附剂吸附水中 K-2BP 的影响最大, 最佳吸附条件为: 改性花生壳和木屑的质量比 1: 3.5, 混合吸附剂的投加量 0.9  $\text{g}$ , 温度 328  $\text{K}$ , pH 值 14, 振荡速率 120  $\text{r/min}$ , 此时水中 K-2BP 的去除率可达 98.6%;

(2) 在不同温度条件下对不同浓度的 K-2BP 进行处理, 发现 Langmuir 吸附模型和伪二级动力学模型能较好地描述混合吸附剂对水中 K-2BP 的吸附过程, 理论的最大吸附量为 10.83  $\text{mg/g}$ ;

(3) 采集混合吸附剂吸附 K-2BP 的等温吸附曲线数据, 通过方程拟合和数据计算得到  $\Delta H^\theta$  大于 0,  $\Delta G^\theta$  小于 0, 说明吸附过程为吸热反应, 可自发进行。

从本研究的结果可知,改性花生壳和木屑制成的混合吸附剂对含有 K-2BP 的染料废水的处理理论上可行。由于花生壳和木屑来源丰富,容易获取,将其运用于染料废水处理做到“以废治污”,既让废水得到治理,又能节约处理这些废弃物所需的大量成本,更能提高两种废弃物的综合经济价值,因此改性花生壳和木屑吸附 K-2BP 技术在实际污染处理中具有良好的应用前景。

### 参考文献:

[1] 陈为健,程贤魁,陈跃先,等. 硫酸法测定花生壳中木质素的含量[J]. 闽江学院学报, 2002, 23(2):72-73+76.

[2] 廖朝东. 花生壳的化工利用[J]. 化工技术与开发, 2004, 33(2):24-25+35.

[3] Gurusamy A, Ruey-Shin J, Duu-Jong L. Use of cellulose-based wastes for adsorption of dyes from aqueous solutions[J]. Journal of Hazardous Materials, 2002, 92(3):263-274.

[4] 张林生,蒋岚岚. 染料废水的脱色方法[J]. 化工环保, 2000, 20(1):14-18.

[5] 宋应华,朱家文,陈葵,等. 大孔吸附树脂对红霉素的平衡吸附行为及其热力学性质[J]. 化工学报, 2006, 57(4):715-718.

[6] Yu B, Zhang Y, Shukla A, et al. The removal of heavy metal from aqueous solutions by sawdust adsorption removal of copper[J]. Journal of Hazardous Materials, 2000, 80(1-3):33-42.

[7] 刘刚. 花生壳的妙用[J]. 化学教学, 2001(4):48.

[8] 张庆芳,杨国栋,孔秀琴,等. 改性花生壳吸附水中  $\text{Cr}^{6+}$  的研究[J]. 化学与生物工程, 2008, 25(2):29-31.

[9] 杨中志,蒋剑春,徐俊明,等. 木屑液化剩余物制备活性炭的探索研究[J]. 炭素技术, 2013, 32(2):11-15.

[10] 周隽,翟建平,吕慧峰,等. 木屑和花生壳吸附去除水溶液中  $\text{Cr}^{3+}$  的试验研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7(1):122-125.

[11] Langmuir I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum[J]. Journal of the American Chemical Society, 1918, 40(9):1361-1403.

[12] 郭平,马小凡,康春莉,等. 天然水体中优势菌种非活性细胞吸附  $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  的热力学及动力学研究[J]. 吉林大学学报(理学版), 2004, 42(4):633-635.

[13] Yuh-Shan H. Review of second-order models for adsorption systems[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 136(3):681-689.

[14] 汪芸. 亚甲基蓝在柠檬酸酯化改性麦秆上吸附的动力学和热力学行为[J]. 中山大学研究生学刊(自然科学·医学版), 2009, 30(4):64-72.

(上接第13页)

[7] Pan Bingjun, Qiu Hui, Pan Bingcai, et al. Highly efficient removal of heavy metals by polymer-supported nanosized hydrated Fe(III) oxides: Behavior and XPS study[J]. Water Research, 2010, 44(3):815-824.

[8] Chen W F. Tailoring and regeneration of granular activated carbon for perchlorate removal[D]. The Pennsylvania State University, 2005.

[9] Chen Weifang, Cannon F S. Thermal reactivation of ammonia-tailored granular activated carbon exhausted with perchlorate[J]. Carbon, 2005, 43(13):2742-2749.

[10] Tseng Huihsin, Su Jihgang, Liang Chenju. Synthesis of granular activated carbon/zero valent iron composites for simultaneous adsorption/dechlorination of trichloroethylene[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 192(2):500-506.

[11] Doula M K. Synthesis of a clinoptilolite-Fe system with

high Cu sorption capacity[J]. Chemosphere, 2007, 67(4):731-740.

[12] Lee S M, Laldawngliana C, Tiwari D. Iron oxide nanoparticles-immobilized-sand material in the treatment of Cu(II), Cd(II) and Pb(II) contaminated waste waters[J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 195-196:103-111.

[13] Phuengprasop T, Sittiwong J, Unob F. Removal of heavy metal ions by iron oxide coated sewage sludge[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 186(1):502-507.

[14] Granados-Correa F, Corral-Capulin N G, Olguín M T, et al. Comparison of the Cd(II) adsorption processes between boehmite ( $\gamma$ - $\text{AlOOH}$ ) and goethite ( $\alpha$ - $\text{FeOOH}$ ) [J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 171(3):1027-1034.