

郭祥, 钟成华, 邓春光, 等. 2013. KOH 活化法制备牛粪活性炭的研究[J]. 环境科学学报, 33(9):2459-2465

Guo X, Zhong C H, Deng C G, et al. 2013. Preparation of activated carbon from cow dung by chemical activation with potassium hydroxide[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 33(9):2459-2465

KOH 活化法制备牛粪活性炭的研究

郭祥¹, 钟成华^{2,*}, 邓春光³, 曾雪梅⁴, 王涛², 周小琴², 苏翔²

1. 西南大学化学化工学院, 重庆 400715
2. 重庆工商大学环境与生物工程学院, 重庆 400067
3. 重庆市环境科学研究院, 重庆 401147
4. 南岸区环境监测站, 重庆 400060

收稿日期: 2013-01-06 修回日期: 2013-03-01 录用日期: 2013-03-01

摘要:以牛粪为原料, 采用 KOH 活化法制备活性炭, 并考察了浸渍比、活化剂浓度、活化时间和活化温度等不同制备条件对牛粪活性炭样品性能的影响. 实验结果表明, 在浸渍比 1:4, KOH 质量分数 35%、活化时间 60 min、活化温度 700 °C 条件下制备的活性炭性能最佳, 制得的活性炭比表面积为 979.8 m²·g⁻¹, 碘吸附值可达 796.37 mg·g⁻¹, 亚甲基蓝吸附值可达 150.30 mg·g⁻¹. 最后, 将制备的牛粪活性炭应用于对 Cr(VI) 的吸附, 研究了最佳工艺条件下制备的活性炭吸附 Cr(VI) 的适宜条件. 结果表明, 在投加量为 8 g·L⁻¹ 时, 吸附时间 90 min、pH 值为 5 和较低温度的适宜条件下, 自制牛粪活性炭对 Cr(VI) 的吸附量最大.

关键词:牛粪; 活性炭; Cr(VI); 吸附

文章编号: 0253-2468(2013)09-2459-07 中图分类号: X703 文献标识码: A

Preparation of activated carbon from cow dung by chemical activation with potassium hydroxide

GUO Xiang¹, ZHONG Chenghua^{2,*}, DENG Chunguang³, ZENG Xuemei⁴, WANG Tao², ZHOU Xiaoqin², SU Xiang²

1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Southwestern University, Chongqing 400715
2. College of Environmental and Biological Engineering, Chongqing T&B University, Chongqing 400067
3. Environmental Science Research Institute of Chongqing, Chongqing 401147
4. Environmental Monitoring Station of The South Bank District, Chongqing 400060

Received 6 January 2013; received in revised form 1 March 2013; accepted 1 March 2013

Abstract: Activated carbon was prepared from cow dung using KOH as the activator in this study. Different conditions on the performance of the cow dung activated carbon samples were studied, which included the impregnation ratio, the concentration of activators, the activation time and the activation temperature. The results showed that the preparation of the activated carbon have the best performance under the optimum conditions of impregnation ratio 1:4, KOH mass fraction 35%, activation time 60 min, and activation temperature 700 °C. Under this condition, the relative surface area can reach 979.82 m²·g⁻¹, the adsorption of iodine gets up to 796.37 mg·g⁻¹, and the adsorption of methylene blue can be up to 150.30 mg·g⁻¹. In addition, the appropriate conditions for Cr(VI) adsorption were studied using cow dung activated carbon which was prepared under the optimum conditions. The results show that homemade cow dung of activated carbon have the maximum adsorption capacity for Cr(VI) under the dosage of 8 g·L⁻¹, adsorption time 90 min, pH value is 5 and lower temperature suitable conditions.

Keywords: cow dung; activated carbon; Cr(VI); adsorption

1 引言(Introduction)

近年来, 随着我国经济快速发展、人民生活水

平的不断提高, 养牛业得到了迅猛发展. 养牛业的迅猛发展带来了巨大的经济效益和社会效益, 但同时也带来了许多环境污染问题, 尤其是其排泄物带

基金项目: 重庆市可持续发展建设示范(一期)项目(No. CSTC, 2010AA0020); 重庆市城乡建设委员会资助项目(城科字 2009 第 119 号)

Supported by the Program of Sustainable Development Demonstration Construction of Chongqing(Tranche)(No. CSTC, 2010AA0020) and Urban Construction Committee Support Project of Chongqing(No. City word 2009-119th)

作者简介: 郭祥(1982—), 男, E-mail: gx7568573@163.com; * 通讯作者(责任作者), E-mail: zhong.chenghua@163.com

Biography: GUO Xiang(1982—), male, E-mail: gx7568573@163.com; * **Corresponding author**, E-mail: zhong.chenghua@163.com

来的环境问题日益严峻.对牛粪进行综合利用,使之资源化、无害化,才能有效解决牛粪污染问题,从而实现养牛业的可持续发展.

实现养牛业的可持续发展,关键是要遵循“减量化 (Reduce)”、“再利用 (Reuse)”、“再循环 (Recycle)” (称为 3R 原则) 的基本原则 (王修川, 2007). 目前,对于牛粪综合利用的途径主要有利用微生物发酵生产有机肥 (盛怡林等, 2010; Petersen *et al.*, 2007; 王为等, 2009)、厌氧发酵制备沼气 (Monteiro *et al.*, 2011; Ashekuzzaman *et al.*, 2011; Gong *et al.*, 2011)、堆肥发酵制备氢气 (Ren *et al.*, 2010; Fan *et al.*, 2006)、生产生物柴油 (Li *et al.*, 2011)、燃烧发电等 (Dagnall *et al.*, 2000). 如果将牛粪用于制备活性炭,不仅可使牛粪的利用多元化,变废为宝,而且还能以废治废,产生巨大的环境、经济和社会效益.

因此,本文以 KOH 为活化剂,采用碳化活化一步法制备牛粪活性炭,探讨其最佳制备工艺参数,并将制得的活性炭应用于吸附 Cr(VI) 的研究,考察吸附条件对 Cr(VI) 吸附性能的影响.

2 材料和方法 (Materials and methods)

2.1 原料、试剂与仪器

牛粪为取自重庆市北碚区上马台村农户家养的牛粪,养牛饲料以农作物秸秆为主. 氢氧化钾、重铬酸钾均为分析纯. 仪器主要包括 AL104 电子天平, MFL-2000 马弗炉, DHG-9070A 电热恒温鼓风干燥箱, UV-3100PC 紫外-可见分光光度计, PHS-2F 型精密 PH 计和 SHZ-88A 往复式水浴恒温振荡器.

2.2 牛粪活性炭的制备

将自然晾晒的牛粪粉碎至 2~5 mm, 分别取 5 g 牛粪和活性炭原料于 100 mL 坩埚中, 并配制不同浓度 (15%~55%) 的 KOH 溶液, 按一定的固液比充分混合后浸渍 24 h; 然后置于马弗炉中, 按 20 °C·min⁻¹ 的升温速度升温至不同温度 (400~800 °C) 下活化一定时间制得牛粪活性炭. 用 (1+9) 的盐酸溶液充分洗涤冷却后的牛粪活性炭, 再用 80 °C 左右的去离子水反复洗涤至中性, 过滤后放入烘箱中在 110 °C 下烘 16 h. 冷却后充分研磨并过筛, 用样品袋装好, 放入干燥皿中备用.

2.3 Cr(VI) 标准溶液吸附标准曲线的绘制

配制质量浓度分别为 10、20、40、60、80 和 100 mg·L⁻¹ 的 Cr(VI) 溶液 (采用重铬酸钾配置制) 共 6

份, 用紫外-可见分光光度计在最大吸收波长 (350 nm) 处测定其吸光值, 以 Cr(VI) 浓度为横坐标, 吸光值为纵坐标绘制标准曲线, 结果见图 1. 由图 1 可以看出, 在所测定的浓度范围内, Cr(VI) 浓度越大, 吸光值越大, 且由线性方程和可决系数可知, 溶液中 Cr(VI) 浓度与吸光值呈现良好的线性关系, 符合朗伯-比尔定律.

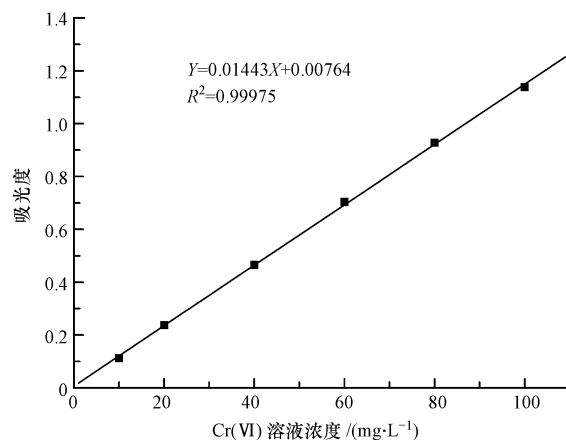


图 1 Cr(VI) 标准曲线

Fig. 1 Standard curve of Cr(VI)

不同浓度的 Cr(VI) 具有不同的吸光度, 利用吸附前后溶液吸光度的变化来表征活性炭对 Cr(VI) 吸附量的大小, 即:

$$C = C_0 - C_F \quad (1)$$

式中, C 为吸附浓度 (mg·L⁻¹), C_0 为原溶液浓度, 取值为 100 mg·L⁻¹, C_F 为吸附后溶液浓度 (mg·L⁻¹).

2.4 活性炭去除 Cr(VI) 影响因素试验

2.4.1 投加量 配制 6 份浓度均为 100 mg·L⁻¹ 的 Cr(VI) 溶液于 100 mL 碘量瓶中, 分别加入不同质量的自制牛粪活性炭, 在 25 °C、180 r·min⁻¹ 条件下恒温振荡 80 min 后过滤, 取滤液测定其吸光度, 考察温度对活性炭投加量吸附 Cr(VI) 的影响.

2.4.2 温度条件 配制浓度均为 100 mg·L⁻¹ 的 Cr(VI) 溶液 6 份于 100 mL 碘量瓶中, 加入一定质量的自制牛粪活性炭, 振荡频率 180 r·min⁻¹, 在不同温度条件下振荡 80 min 后过滤, 取滤液测定其吸光度, 考察活性炭对 Cr(VI) 吸附量受温度的影响.

2.4.3 吸附时间 配制浓度均为 100 mg·L⁻¹ 的 Cr(VI) 溶液 6 份于 100 mL 碘量瓶中, 加入一定质量的自制牛粪活性炭, 在 25 °C、180 r·min⁻¹ 条件下分别振荡不同时间后过滤, 取滤液测定其吸光度, 考察吸附时间对活性炭吸附 Cr(VI) 量的影响.

2.4.4 pH 值 配制浓度均为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{Cr}(\text{VI})$ 溶液 5 份于 100 mL 碘量瓶中,加入一定质量的自制牛粪活性炭,调节溶液 pH 至不同值,在 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下振荡 80 min 后过滤,取滤液测定其吸光度,考察不同 pH 值对活性炭吸附 $\text{Cr}(\text{VI})$ 量的影响。

3 结果与讨论 (Results and discussion)

3.1 制备条件对牛粪活性炭得率及碘和亚甲基蓝吸附值的影响

3.1.1 活化剂浓度的影响 在浸渍比 1:3、活化时间 60 min 、活化温度 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下,考察 KOH 浓度在 $25\% \sim 55\%$ 范围内,对制备的牛粪活性炭得率及碘和亚甲基蓝吸附值的影响,实验结果如图 2 所示。从图 2 可以看出,随着 KOH 浓度的升高,活性炭得率、碘和亚甲基蓝吸附值均呈现先上升后下降的现象。KOH 浓度为 35% 时,得率最大为 34.69% ,超过这一浓度,得率开始下降。KOH 浓度为 45% 时,碘和亚甲基蓝吸附值最大,分别为 $773.79 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $140.355 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。这是因为在低浓度时,牛粪没有被

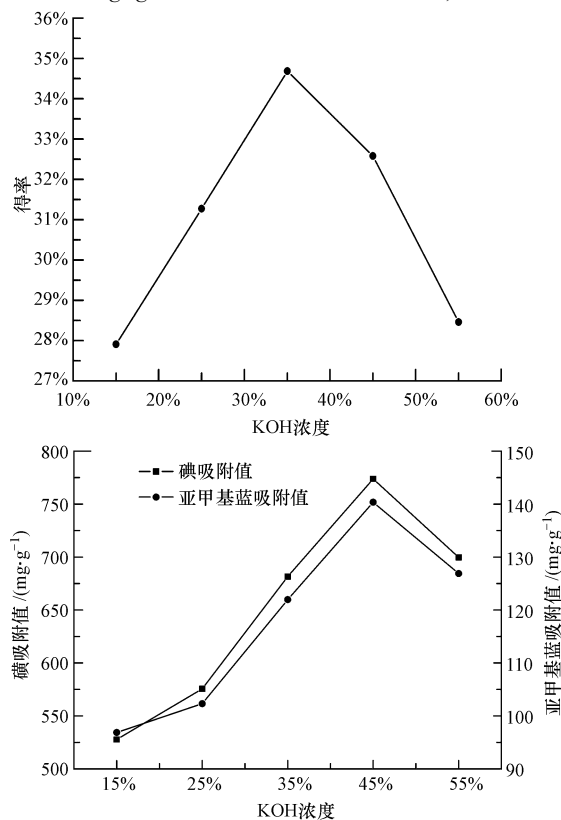


图 2 KOH 浓度对牛粪活性炭得率及吸附性能的影响

Fig. 2 Influence of KOH concentration on the yield and adsorption capability of cow dung activated carbon

充分活化,吸附性能相对较差。随着 KOH 浓度的增加,牛粪得到了充分的活化,微孔数量所占比例上升,因此,吸附能力迅速提高。但当 KOH 浓度过高时,就会对牛粪造成过度活化,微孔数量下降,中孔和大孔数量占优,因此,活性炭吸附性能降低。

3.1.2 浸渍比的影响 在 KOH 浓度 25% 、活化时间 60 min 、活化温度 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下,考察浸渍比在 $1:1 \sim 1:5$ 范围内,对制备的牛粪活性炭得率及碘和亚甲基蓝吸附值的影响,结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,随着浸渍比值的增大,活性炭得率、碘和亚甲基蓝吸附值也均呈现先上升后下降的趋势。浸渍比对得率 ($17\% \sim 30\%$) 的影响较大,在浸渍比为 $1:3$ 时,得率最大为 29.95% ,超过这一比例,得率开始下降。在浸渍比 $1:4$ 时,碘和亚甲基蓝吸附值最大,分别为 $718.16 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $129.225 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。超过这一浸渍比,也是由于 KOH 含量过多,对牛粪造成过度活化,微孔遭到破坏,因此,活性炭吸附性能下降。

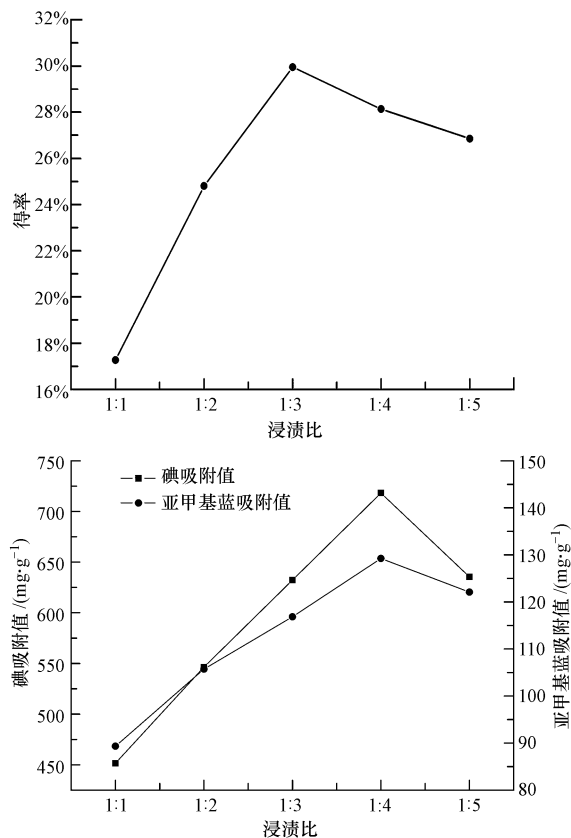


图 3 浸渍比对牛粪活性炭得率及吸附性能的影响

Fig. 3 Influence of impregnation ratio on the yield and adsorption capability of cow dung activated carbon

3.1.3 活化时间的影响 在浸渍比 $1:3$ 、KOH 浓度 25% 、活化温度 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下,考察活化时间在

20 ~ 100 min 范围内,对制备的牛粪活性炭得率及碘和亚甲基蓝吸附值的影响,结果如图 4 所示.从图 4 可以看出,活性炭得率随着活化时间的增加逐渐下降,碘和亚甲基蓝吸附值随着活化时间的增加先上升后下降.在活化时间为 60 min 时,碘和亚甲基蓝吸附值达到最大,分别为 $669.25 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $127.68 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$.活化时间进一步延长,活性炭吸附性能下降.可能是因为在初始反映阶段,微孔迅速增加,当活化时间达 60 min 时,微孔数量增加到最大值;当时间超过 60 min 时,微孔增加的速度小于被烧蚀的速度,活性炭孔结构遭到破坏,因而吸附性能下降.所以,活化时间以 60 min 为宜.

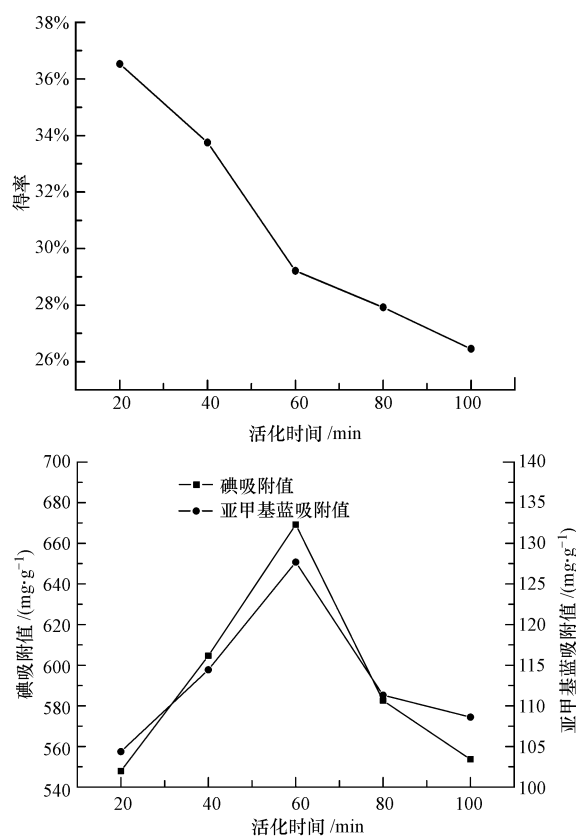


图 4 活化时间对牛粪活性炭得率及吸附性能的影响

Fig. 4 Influence of activation time on the yield and adsorption capability of cow dung activated carbon

3.1.4 活化温度的影响 在浸渍比 1:3、KOH 浓度 25%、活化时间 60 min 的条件下,考察活化温度在 400 ~ 800 °C 范围内,对制备的牛粪活性炭得率及碘和亚甲基蓝吸附值的影响,结果如图 5 所示.从图 5 可以看出,随着活化温度的不断升高,活性炭得率逐渐下降,碘和亚甲基蓝吸附值先上升后下降.当活化温度为 700 °C 时,碘和亚甲基蓝吸附值达到最大,分别为 $788.15 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $147.30 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$.但当

活化温度超过 700 °C 时,活性炭吸附值下降比较明显.这是由于温度过高,使得微孔破坏速度大于微孔生成速度,总孔容积也进一步减小,因而活性炭吸附性能降低.所以,最适活化温度选择为 700 °C.

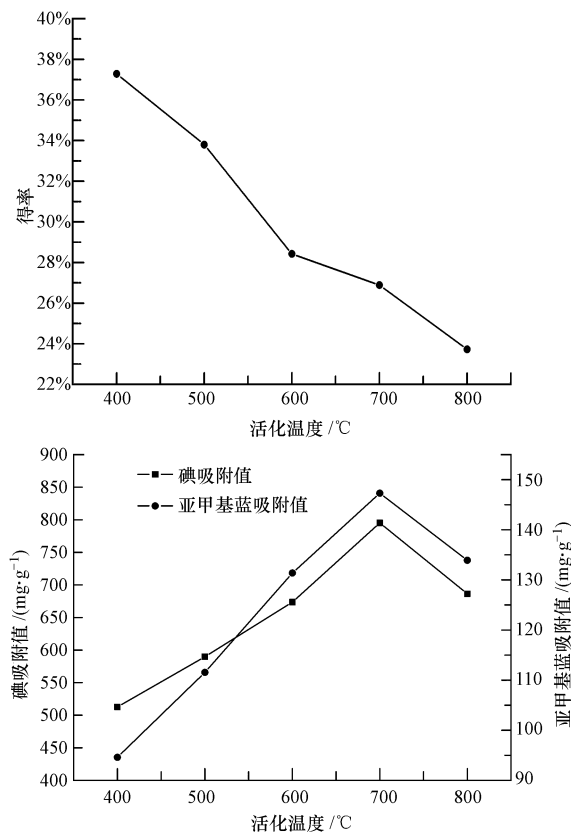


图 5 活化温度对牛粪活性炭得率及吸附性能的影响

Fig. 5 Influence of activation temperature on the yield and adsorption capability of cow dung activated carbon

3.2 正交优化实验结果分析

选取上述每个因素活化试验中对得率、碘和亚甲基蓝吸附值影响最大的 3 个水平,以得率、碘和亚甲基蓝吸附值为考察指标,选取 $L_9(3^4)$ 正交表进行试验.因素和水平表见表 1,正交优化实验的计算结果见表 2,其中,参数 k 为各因素下相同水平的指标平均值,极差 R 为相同因素不同水平的指标平均值中最大值与最小值差.

表 1 KOH 活化牛粪制备活性炭正交优化试验因素水平表

Table 1 Factors and levels of orthogonal tests in the preparation of activated carbon with cow dung activated by potassium hydroxide

水平编码	浓度 A	浸渍比 B	活化时间 C /min	活化温度 D /°C
1	25%	1:3	40	600
2	35%	1:4	60	700
3	45%	1:5	80	800

由表 2 可知,在 $A_2B_2C_3D_1$ 试验条件下制备的活性炭得率最大,在 $A_3B_1C_3D_2$ 试验条件下制备的活性炭碘和亚甲基蓝吸附值最大.在保证较高得率的前提下综合考虑,KOH 活化法制备牛粪活性炭的最佳工艺条件为:KOH 浓度 35%,浸渍比 1:4,活化时间

60 min,活化温度 700 °C.在该最佳工艺条件下制备的活性炭平均得率为 33.59%,比表面积平均值为 $979.8 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,碘吸附值平均值为 $796.37 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,亚甲基蓝吸附值平均值为 $150.30 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$.

表 2 正交优化试验及结果分析

Table 2 Orthogonal optimization tests and result analysis

序号	各因素水平编码				得率	碘吸附值 $/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	亚甲基蓝吸附值 $/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$
	A	B	C	D			
1	1	1	1	1	33.29%	637.292	116.685
2	1	2	2	2	31.85%	741.471	136.800
3	1	3	3	3	25.92%	701.735	133.185
4	2	1	2	3	26.97%	716.103	133.290
5	2	2	3	1	34.56%	695.828	132.555
6	2	3	1	2	32.41%	752.619	139.635
7	3	1	3	2	29.15%	781.850	141.675
8	3	2	1	3	28.03%	775.269	141.405
9	3	3	2	1	30.89%	738.576	137.445
k_{Y1}	30.35%	29.80%	31.24%	32.91%			
k_{Y2}	31.31%	31.48%	29.90%	31.14%			
k_{Y3}	29.36%	29.74%	29.88%	26.97%			
R_Y	1.96%	1.74%	1.37%	5.94%			
k_{I1}	693.499	711.748	721.727	690.565			
k_{I2}	721.517	737.523	732.050	758.647			
k_{I3}	765.232	730.977	726.471	731.036			
R_I	71.733	25.775	10.323	68.082			
k_{M1}	128.895	130.545	132.570	128.895			
k_{M2}	135.165	136.920	135.840	139.365			
k_{M3}	140.175	136.755	135.810	135.960			
R_M	11.280	6.375	3.270	10.470			

注: k_Y 、 k_I 、 k_M (R_Y 、 R_I 、 R_M)分别表示得率、碘吸附值、亚甲基蓝吸附值的 k (R)值.

3.3 牛粪活性炭吸附Cr(VI)的适宜条件分析

Cr(VI)废水是对环境污染最严重和对人类危害最大的重金属工业废水之一,主要来源于矿山开采、皮革鞣质、电镀、制铬、机械加工等行业(张蕊等,2011;Park *et al.*,2004;郑少平等,2007).目前,

Cr(VI)废水的处理方法有沉淀法、物理化学法、电化学处理技术、生物化学法等.利用在最佳工艺条件下制备的牛粪活性炭对Cr(VI)(浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)废水进行处理,并与商业活性炭进行对比.牛粪活性炭与商业活性炭的各项性能指标见表 3.

表 3 牛粪活性炭和商业活性炭性能参数

Table 3 Performance parameter of cow dung activated carbon and commercial activated carbon

吸附剂	比表面积 $/(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	总孔容积 $/(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	碘吸附值 $/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	亚甲基蓝吸附值 $/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$
牛粪活性炭	950 ± 50	0.96	796.37	150.30
商业活性炭	600 ± 50	0.60	503.29	95.55

3.3.1 投加量的影响 在实验温度 25 °C、吸附时间 80 min、pH = 4 的条件下,测定投加量分别为 1、

2、4、6、8 和 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时牛粪活性炭对Cr(VI)去除率的影响,并以商业活性炭作对比,实验结果如图 6a

所示.可以看出,随着活性炭投加量的增加,两种活性炭对Cr(VI)的去除率迅速增大,当牛粪活性炭投加量增加到 $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时基本上达到吸附饱和,对Cr(VI)的去除率达 88.3%,投加量大于 $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,

去除率增加不明显.对于商业活性炭,当投加量增加到 $6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时基本上达到吸附饱和,对Cr(VI)的去除率为 61.6%.

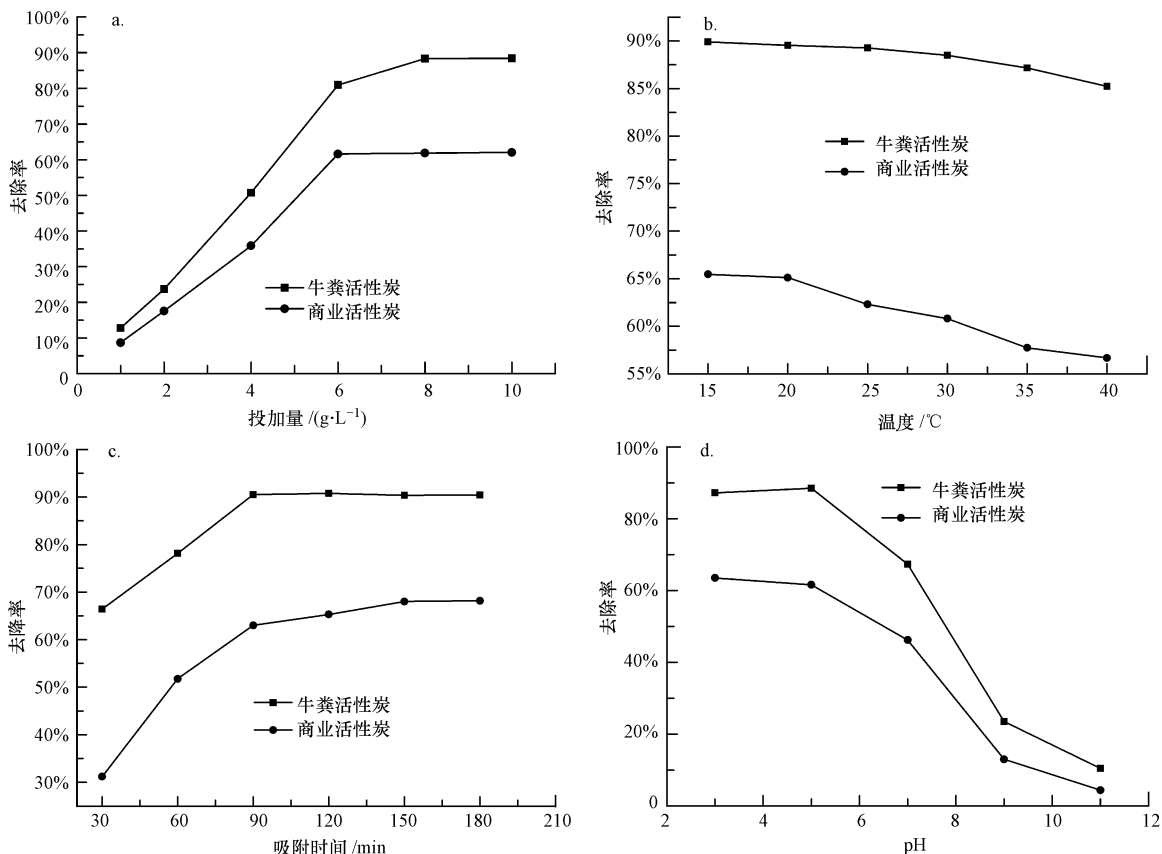


图6 活性炭投加量(a)、温度(b)、吸附时间(c)和pH值(d)对Cr(VI)去除率的影响

Fig. 6 Influence of activated carbon dosage (a), temperature (b), adsorption time (c) and pH value (d) on the removal efficiency of Cr(VI)

3.3.2 温度的影响 在试验 $\text{pH} = 4$ 、活性炭投加量 $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、吸附时间为 80 min 的条件下,测定温度分别为 15、20、25、30、35 和 $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时牛粪活性炭对Cr(VI)的去除率,并以商业活性炭作对比,实验结果如图 6 b 所示.可以看出,两种活性炭对Cr(VI)的去除率随着温度的增加均呈下降趋势,这是由于吸附一般是放热过程,因此,低温状态下有利于吸附.随着温度的升高,活性炭的吸附作用受到抑制,吸附能力下降.

3.3.3 时间的影响 在实验温度 $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、投加量 $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{pH} = 4$ 的条件下,测定吸附时间分别为 30、60、90、120、150 和 180 min 时牛粪活性炭对Cr(VI)的去除率,并以商业活性炭作对比,实验结果如图 6c 所示.可以看出,在一定时间范围内,两种活性炭对Cr(VI)的去除率均随振荡时间的增加而增加,这是因为一开始吸附主要是发生在外表面上,吸附速

率较快.但当Cr(VI)吸附由大孔、中孔逐渐过渡到微孔时,这时Cr(VI)在内孔中的传质速度减慢,吸附容量随着时间的延长缓慢增加直至达到吸附平衡.由图可以看出,牛粪活性炭达到吸附平衡时间要远小于商业活性炭,牛粪活性炭的吸附平衡时间为 90 min 时,而商业活性炭的吸附平衡时间则为 150 min.

3.3.4 pH 值的影响 在实验温度 $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、投加量为 $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、吸附时间为 80 min 的条件下,测定 pH 值分别为 3、5、7、9 和 11 时牛粪活性炭对Cr(VI)的去除率,并以商业活性炭作对比,结果如图 6d 所示.可以看出,pH 值的大小对活性炭去除Cr(VI)的影响非常显著.这是因为活性炭主要以 HCrO_4^- 形式吸附Cr(VI),在 pH 值为 3.0 ~ 5.0 时,Cr(VI)主要以 HCrO_4^- 形式存在,因此,在 pH 值低时,活性炭会大量的吸附 HCrO_4^- .随着 pH 值的不断增大,溶液中

H^+ 浓度逐渐减小,当 pH 值大于 7 时,Cr(VI) 主要以 $Cr_2O_7^{2-}$ 形式存在,吸附量降低,因此,低的 pH 有利于活性炭对 Cr(VI) 的吸附.由图还可知,针对牛粪活性炭,为了达到最好的吸附效果,选取最适 pH 为 5.

4 结论(Conclusions)

1)通过单因素试验和正交优化试验,得出 KOH 活化法制备牛粪活性炭的最佳制备条件为:KOH 溶液质量分数为 35%,浸渍比 1:4,活化温度 700 °C,活化时间 60 min.在此最佳工艺条件下制备的牛粪活性炭吸附性能优于一般商业活性炭,其碘和亚甲基蓝吸附值为一般商业活性炭的 1.5 倍左右.

2)将在最佳工艺条件下制备的牛粪活性炭用于处理模拟 Cr(VI) 废水的试验研究,并与商业活性炭作对比,研究了牛粪活性炭吸附 Cr(VI) 的适宜条件.通过试验研究发现,自制牛粪活性炭对 Cr(VI) 的去除率要高于商业活性炭,其最高去除率接近 90%.

责任作者简介:钟成华(1960—),博士,教授,主要从事水污染控制规划与技术研究,三峡库区水体富营养化控制技术研究.曾先后完成国家和省部级科研项目 20 余项,发表论文 50 余篇,出版专著 1 部,获新型实用专利 2 项.

参考文献(References):

Ashekuzzaman S M, Poulsen T G. 2011. Optimizing feed composition for improved methane yield during anaerobic digestion of cow manure based waste mixtures[J]. *Bioresource Technology*,102:2213-2218
Dagnall S, Hill J, Pegg D. 2000. Resource mapping and analysis of farm

livestock manures-assessing the opportunities for biomass-to-energy schemes[J]. *Bioresource Technology*,71:225-234
Fan Y T, Zhang Y H, Zhang S F, *et al.* 2006. Efficient conversion of wheat straw wastes into biohydrogen gas by cow dung compost[J]. *Bioresource Technology*,97:500-505
Gong W J, Liang H, Li W Z, *et al.* 2011. Selection and evaluation of biofilm carrier in anaerobic digestion treatment of cattle manure[J]. *Energy*,36:3572-3578
Li Q, Zheng L Y, Qiu N, *et al.* 2011. Bioconversion of dairy manure by black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) for biodiesel and sugar production[J]. *Waste Management*,31:1316-1320
Monteiro E, Mantha V, Rouboa A. 2011. Prospective application of farm cattle manure for bioenergy production in Portugal[J]. *Renewable Energy*,36:627-631
Petersen S O, Sommer S G, Béline F, *et al.* 2007. Recycling of livestock manure in a whole-farm perspective [J]. *Livestock Science*,112:180-191
Park D, Yun Y S, Park J M. 2004. Reduction of hexavalent chromium with the brown seaweed *Ecklonia* biomass [J]. *Environmental Science and Technology*,38:4860-4864
Ren N Q, Xu J F, Gao L F, *et al.* 2010. Fermentative bio-hydrogen production from cellulose by cow dung compost enriched cultures [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*,35:2742-2746
盛怡林,宋建苇. 2010. 基于茶籽饼粕和奶牛养殖粪便的生物有机肥创造研究[J]. *畜禽养殖*,11:82-83
王修川. 2007. 吉林省畜禽粪便污染及其综合防治对策[J]. *环境科学与管理*,32(12):168-171
王为,裴蕴华,刘焕友. 2009. 利用牛粪生产生物有机肥试验研究[J]. *生物技术与现代农业*,6:70-71
张蕊,葛滢. 2011. 稻壳基活性炭制备及其对重金属吸附研究[J]. *环境污染与防治*,33(2):41-45
郑少平,李卫平. 2007. 活性炭吸附去除重金属研究进展[J]. *山西建筑*,33(14):153-155