

# 钛白废酸活化制备污泥活性炭及其在榨菜废水处理中的应用

吕利平<sup>1</sup>, 曾行艳<sup>1</sup>, 李航<sup>3</sup>, 李兵<sup>1,2\*</sup>

- (1. 长江师范学院化学化工学院, 武陵山片区绿色发展协调创新中心, 三峡库区环境监测与灾害防治工程研究中心, 重庆 408100;  
2. 中化重庆涪陵化工有限公司, 重庆 408100;  
3. 重庆市三峡水务涪陵排水有限责任公司, 重庆 408000)

**摘要:**以城市污水处理厂二沉池脱水污泥为原料, 钛白废酸为活化剂, 采用化学活化法制备污泥活性炭(PAC)。考察了固液比、炭化时间、炭化温度对制备污泥活性炭吸附性能的影响, 并通过正交实验得出最佳制备参数。将该污泥活性炭用于榨菜废水的处理, 结果表明, 当投加量为 15 g/L, pH 为中性、振荡时间为 120 min 时, 榨菜废水中 COD 和 TP 的去除率分别为 73.6% 和 99.1%。该污泥活性炭对榨菜废水中 COD 的吸附符合 Langmuir 等温模型和准二级动力学与 Elovich 方程。

**关键词:** 钛白废酸; 污泥; 活性炭; 榨菜废水

中图分类号: X705; X703

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2018)05-0099-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2018.05.022

## Preparation of sludge activated carbon via activation of waste acid from titanium dioxide production and its application in mustard tuber wastewater treatment

LV Li-ping<sup>1</sup>, ZENG Xing-yan<sup>1</sup>, LI Hang<sup>3</sup>, LI Bing<sup>1,2\*</sup>

- (1. Research Center for Environmental Monitoring and Hazard Prevention of Three Gorges Reservoir, Collaborative Innovation Center for Green Development in Wuling Mountain Areas, School of Chemistry and Chemical Engineering, Yangtze Normal University, Chongqing 408100, China; 2. Sinochem Fuling Chongqing Chemical Industry Co., Ltd., Chongqing 408100, China; 3. Fuling Drainage Co., Ltd., Chongqing Three Gorges Water Service Company, Chongqing 408000, China)

**Abstract:** Sludge activated carbon is prepared through chemical activation method by using dewatered sludge from a municipal wastewater treatment plant as raw materials and waste acid from titanium dioxide production as an activator. The effects of the ratio of solid to liquid, carbonization time and carbonization temperature on the adsorption performance of the prepared sludge activated carbon are inspected. The optimum preparation parameters are obtained by orthogonal experimental design. This sludge activated carbon is then used to treat with mustard tuber wastewater. The results show that the removal rates of COD and TP in the mustard tuber wastewater can reach 73.6% and 99.1%, respectively when the dosage of sludge activated carbon is 15 g·L<sup>-1</sup>, pH locates at neutral level and oscillation time lasts for 120 min. The adsorption performance of the prepared sludge activated carbon against COD in the mustard tuber wastewater tallies with Langmuir isothermal model, quasi-second-order kinetic and Elovich equation.

**Key words:** waste acid from titanium dioxide production; sewage sludge; activated carbon; mustard tuber wastewater

到2020年, 全国年污泥产量将突破6 000万t<sup>[1]</sup>。面对数量如此庞大的污泥, 目前, 我国主要采用的处理方式卫生填埋, 大量污泥的填埋不仅带来了严重的二次污染, 而且也是对“资源”的一种浪费<sup>[2]</sup>。因此, 污泥的资源化利用不仅可以缓解当前污泥带来的环境污染问题, 还可以实现污水处理行业的可持续发展<sup>[3-5]</sup>。污泥中含有的大量有机质(约占50%~70%)为制备污泥活性炭提供了可能<sup>[6-7]</sup>, 污泥活性炭在环境治理领域表现出了较强的优势<sup>[8-12]</sup>。Rozada等<sup>[13]</sup>、Martin等<sup>[14]</sup>和S.Rio等<sup>[15]</sup>利用硫酸作活化剂制备污泥活性炭, 取得了显著效果。

在钛白粉生产过程中会产生大量的钛白废酸(每生产1 t钛白粉会产生8 t左右约20%的硫酸), 若随意排放将会带来严重的环境污染, 但若经过处理后达标排放又会给企业增添巨大的成本<sup>[16-17]</sup>。将钛白废酸作为活化剂用于污泥活性炭的制备, 不仅使废酸资源得到了有效利用, 还为企业节约了大量的废酸治理费用<sup>[18]</sup>, 从而实现钛白废酸的零排放与资源化利用。在以前的研究中, 将硫酸作为活化剂用于污泥活性炭的制备已有大量的报道, 但将钛白废酸作为活化剂来制备污泥活性炭却鲜有报道。榨菜生产加工过程中产生的榨菜废水具有高

收稿日期: 2017-10-10; 修回日期: 2018-03-11

基金项目: 全国大学生创新创业训练项目(201710647001); 重庆市“科技创新领军人才支持计划”(CSTCCXJRC201703); 重庆市社会事业与民生保障科技创新专项项目(cstc2017shmsA90016); 重庆市教委项目(KJ1712307); 重庆市涪陵区科委项目(FLKJ, 2016ABA1026)

作者简介: 吕利平(1987-), 女, 博士, 讲师, 主要从事固废的减量化与资源化利用研究, lvliping@yznu.edu.cn; 李兵(1975-), 男, 博士, 教授, 主要从事过程强化与绿色化工研究, 通讯联系人, zhhyflb@sina.com。

盐、高磷、高有机物等特点<sup>[19]</sup>,尤其是高盐度对传统活性污泥法有明显的抑制作用<sup>[20-21]</sup>,榨菜废水处理技术成为制约榨菜生产加工企业发展的一大瓶颈。

鉴于此,笔者以剩余污泥为原料,以钛白废酸为活化剂,制备污泥活性炭,并将其用于高浓度榨菜废水的处理,为剩余污泥和钛白废酸的资源化利用及榨菜废水的有效处理提供一种参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 原料、试剂与仪器

#### 1.1.1 污泥来源及性质

实验用污泥取自重庆市涪陵区污水处理厂经带式压滤机脱水后的二沉池干污泥,基本性质如表 1 所示。

表 1 污泥基本性质

pH	含水率/%	挥发性固体质量分数/%	灰分质量分数/%
6.82	76.3	59.9	40.1

#### 1.1.2 钛白废酸来源及性质

实验用钛白废酸取自重庆市某钛白粉厂,基本性质如表 2 所示。

表 2 钛白废酸基本性质

硫酸质量分数/%	Fe <sup>2+</sup> 质量分数/%	密度/(g·mL <sup>-1</sup> )
20	3.49	1.33

#### 1.1.3 榨菜废水来源及性质

实验用榨菜废水取自重庆市涪陵区某榨菜生产企业,基本性质如表 3 所示。

表 3 榨菜废水基本性质

pH	COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	TP/(mg·L <sup>-1</sup> )
7.14	3818	37.1

### 1.2 污泥活性炭的制备

将二沉池脱水干污泥于 103~105℃ 下干燥至恒重,待冷却后研细并过 100 目筛,将过筛污泥与钛白废酸按一定的固液比搅拌混匀,在室温下活化 24 h。活化样品经干燥后以 15℃/min 的升温速率在一定的温度和时间下活性炭化。待样品冷却后用 10% HCl 反复清洗数次至洗液澄清,再用 70℃ 去离子水漂洗至洗液为中性。随后将样品干燥至恒重,待冷却后研细并过 100 目筛,即制得污泥活性炭(PAC)。以固液比(A)、炭化时间(B)、炭化温度(C) 3 个因素进行正交实验,以制得的污泥活性炭碘吸附值为衡量标准,从而获取钛白废酸制备污泥活性炭的最佳工艺参数。

### 1.3 污泥活性炭对榨菜废水的吸附性实验

称取一定量的污泥活性炭,分别加入 100 mL 榨菜废水,调节体系 pH,以 150 r/min 速率在恒温水浴振荡器上振荡吸附一定时间,过滤后测定滤液的 COD 和 TP 质量浓度并计算去除率。COD/TP 去除率计算式为:

$$\eta = [(C_0 - C)/C_0] \times 100\%$$

式中: $\eta$  为去除率,%; $C_0$  和  $C$  分别为吸附前后滤液中 COD/TP 的质量浓度,mg/L。

### 1.4 主要实验仪器

DR5000 型紫外分光光度计;DRB200 消解器;DR2800 分光光度计;2.5-10 型马弗炉;HCA-100 型 COD 消解器;SHA-B 型恒温水浴振荡器;YM30 型压力蒸汽灭菌器;GZX-DH.400BS 型电热干燥箱;721 型分光光度计;QUDRASORB SI 全自动比表面和孔隙度分析仪。

## 2 结果与讨论

### 2.1 污泥活性炭制备条件优化

为了得到钛白废酸制备污泥活性炭的最佳实验条件,采用三因素三水平正交实验考察固液比(A)、炭化时间(B)、炭化温度(C)对污泥活性炭碘吸附值的影响,正交实验因素水平和结果分别如表 4、表 5 所示。

表 4 正交实验因素水平表

水平	因素 A	因素 B	因素 C
	固液比	炭化时间/min	炭化温度/℃
1	1:1	45	250
2	1:2	75	350
3	1:3	105	450

表 5 图正交实验结果

序号	A	B	C	碘吸附值/(mg·g <sup>-1</sup> )
1	1:1	45	250	295.9
2	1:1	75	350	327.2
3	1:1	105	450	183.2
4	1:2	45	350	276.6
5	1:2	75	450	285.1
6	1:2	105	250	166.3
7	1:3	45	450	197.2
8	1:3	75	250	275.9
9	1:3	105	350	348.4
K1	806.3	769.7	738.1	
K2	728.0	888.2	952.2	
K3	821.5	697.9	665.5	
k1	268.8	256.6	246.0	

续表

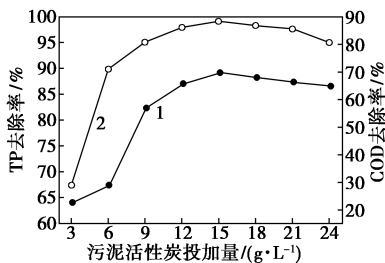
序号	A	B	C	碘吸附值/( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )
k2	242.7	296.1	317.4	
k3	273.8	232.6	221.8	
R	31.1	63.5	95.6	
主次顺序		C>B>A		
优水平	A <sub>3</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	
优组合	A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub>			

由极差分析可知,  $R_C > R_B > R_A$ , 即影响钛白废酸制备污泥活性炭吸附性能的主次顺序为炭化温度>炭化时间>固液比; 由  $K$  值可以得出制备优化条件为  $A_3B_2C_2$ , 即固液比为 1:3, 炭化时间为 75 min, 炭化温度为 350℃, 此条件下制得的污泥活性炭碘吸附值为 406.40  $\text{mg/g}$ , 比表面积为 753.76  $\text{m}^2/\text{g}$ , 总孔容为 0.4757  $\text{cm}^3/\text{g}$ , 含氧官能团的质量摩尔浓度为 1.6530  $\text{mmol/g}$ 。

## 2.2 污泥活性炭对榨菜废水的吸附

### 2.2.1 污泥活性炭投加量对吸附效果的影响

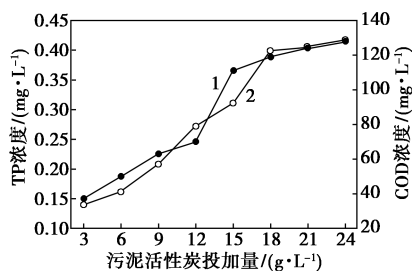
当榨菜废水体积为 100 mL, 振荡频率为 150  $\text{r/min}$ , 水浴温度为 30℃, 振荡时间为 180 min, pH 维持不变时, 污泥活性炭投加量对榨菜废水中 COD 和 TP 的影响如图 1 所示。



1—COD 去除率; 2—TP 去除率

图 1 投加量对吸附效果的影响

从图 1 可以看出, 随着投加量的增加, 废水中 COD 和 TP 的去除率均呈现上升趋势并在投加量为 15  $\text{g/L}$  时达到最大值, 此时, COD 和 TP 的去除率分别为 69.8% 和 99.1%。随着投加量的进一步增加, COD 和 TP 的去除率均出现下降趋势。原因是因为制备活性炭所用的污泥自身含有大量的 COD 和 TP, 经高温炭化后仍有少量残留, 随着投加量的增加, 残留在活性炭中的 COD 和 TP 溶解出来的量也呈现上升趋势, 这种解释可由投加量对空白实验的影响(如图 2 所示)的结果中得到验证, 即用去离子水代替废水进行空白实验, 随着污泥活性炭投加量的增加, 检测出来的 COD 和 TP 的浓度均呈递增趋势。由此得出, 污泥活性炭处理榨菜废水的最佳投加量为 15  $\text{g/L}$ 。

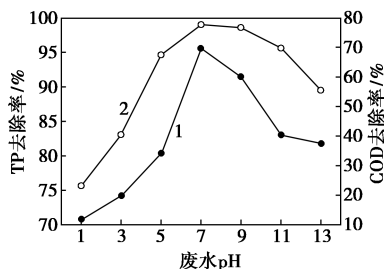


1—COD 浓度; 2—TP 浓度

图 2 投加量对空白实验的影响

### 2.2.2 废水 pH 对吸附效果的影响

当榨菜废水体积为 100 mL, 振荡频率为 150  $\text{r/min}$ , 水浴温度为 30℃, 振荡时间为 180 min, 污泥活性炭投加量为 15  $\text{g/L}$  时, pH 对榨菜废水中 COD 和 TP 的影响如图 3 所示。



1—COD 去除率; 2—TP 去除率

图 3 pH 对吸附效果的影响

从图 3 可以看出, 当溶液的 pH 为酸性时, 污泥活性炭对废水中 COD 和 TP 的吸附量随着 pH 的增加而增大。这是因为当 pH 较低时, 溶液中 H 离子浓度较高, 而 H 离子会与污泥活性炭表面官能团如羟基、羧基、羰基、醛基等含氧官能团结合, 使得活性炭表面的亲和性发生改变, 从而导致活性炭表面的主要活性位被 H 离子占据, 进而影响废水中 COD 和 TP 的吸附; 但随着 pH 的增加, 与活性炭表面含氧官能团结合的 H 离子会发生离解, 从而使得活性炭中大量的活性点位暴露出来, 污染物会迅速占据这些活性位而被有效吸附。所以随着 pH 的增加, COD 和 TP 的去除率逐渐增大。但当溶液的 pH 继续增加到碱性时, 体系中大量存在的  $\text{OH}^-$  会与铁离子反应生成沉淀, 进而堵塞污泥活性炭孔道, 使得大量的吸附点位被再次占据, 且随着 pH 的升高, 这种影响将进一步增大。由此可知, 污泥活性炭处理榨菜废水的最佳 pH 为中性, 鉴于榨菜废水 pH 为 7.14, 从经济性和工业可操作性考虑, pH 不作调整。

### 2.2.3 振荡时间对吸附效果的影响

当榨菜废水体积为 100 mL, 振荡频率为

150 r/min,水浴温度为 30℃,污泥活性炭投加量为 15 g/L时,pH 不作调整,振荡时间对榨菜废水中 COD 和 TP 的影响如图 4 所示。

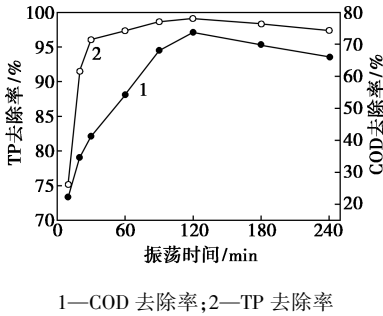


图 4 振荡时间对吸附效果的影响

从图 4 可以看出,随着振荡时间的延长,废水中 COD 和 TP 的去除率均呈现上升趋势,且在振荡时间为 120 min 时,COD 和 TP 的去除率达到最大值,分别为 73.6% 和 99.1%。原因是因为污泥活性炭具有较大的比表面积,使其具备极强的吸附能力。但随着振荡时间的进一步延长,COD 和 TP 的去除率反而下降,主要是因为制备的活性炭所用污泥自身含有大量的 COD 和 TP,经高温炭化后仍有部分残留,随着振荡时间的延长,残留在活性炭中的 COD 和 TP 溶解出来的量也呈现上升趋势,这种解释可由振荡时间对空白实验的影响(如图 5 所示)结果得到验证,即用去离子水代替废水进行空白实验,随着振荡时间的延长,检测出来的 COD 和 TP 浓度均呈递增趋势。由此得出,污泥活性炭处理榨菜废水的最佳振荡时间为 120 min。

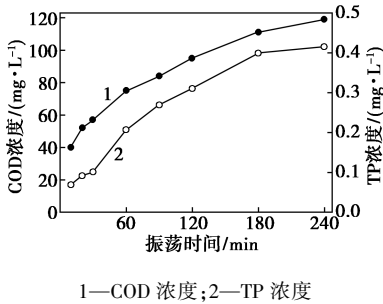


图 5 振荡时间对空白实验的影响

### 2.2.4 吸附等温线

将污泥活性炭对榨菜废水中 COD 的吸附数据进行 Langmuir 和 Freundlich 等温吸附模型拟合,拟合曲线如图 6 所示,拟合参数如表 6 所示。

从表 6 可以看出,在不同温度下,Langmuir 模型相关指数均明显高于 Freundlich 模型,说明 Langmuir 模型更适合描述 PAC 对榨菜废水的吸附行为,PAC 对榨菜废水中 COD 的吸附为单分子层吸

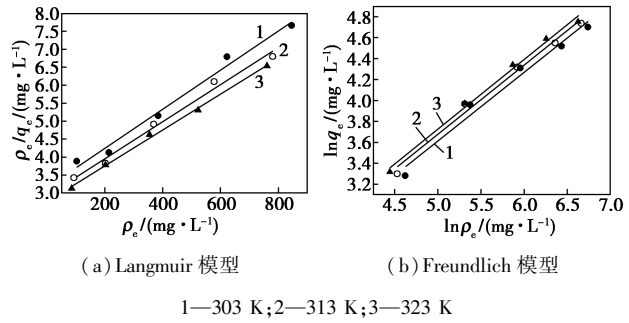


图 6 Langmuir 和 Freundlich 等温吸附模型

表 6 Langmuir 和 Freundlich 模型拟合参数

T/K	Langmuir 模型			Freundlich 模型		
	$Q_m/(mg \cdot g^{-1})$	$K_L/(L \cdot mg^{-1})$	$R^2$	$n$	$K_F$	$R^2$
303	185.19	0.001709	0.9861	1.51	1.36	0.9773
313	192.31	0.001778	0.9895	1.51	1.43	0.9879
323	200.00	0.001813	0.9970	1.50	1.47	0.9932

注: $\rho_e$  为平衡质量浓度; $q_e$  为平衡吸附量; $Q_m$  为活性炭饱和和吸附量; $K_L$  为 Langmuir 平衡常数; $n$  为 Freundlich 浓度指数; $K_F$  为 Freundlich 平衡常数。

附;随着温度的升高,PAC 饱和和吸附量  $Q_m$  呈上升趋势,说明该吸附行为属于吸热过程,升高温度有助于吸附。

### 2.2.5 吸附动力学

为研究污泥活性炭对榨菜废水中 COD 的吸附动力学特征,采用准一级动力学、准二级动力学、Elovich 方程和颗粒内扩散方程进行拟合,拟合曲线如图 7 所示,拟合参数如表 7 所示。

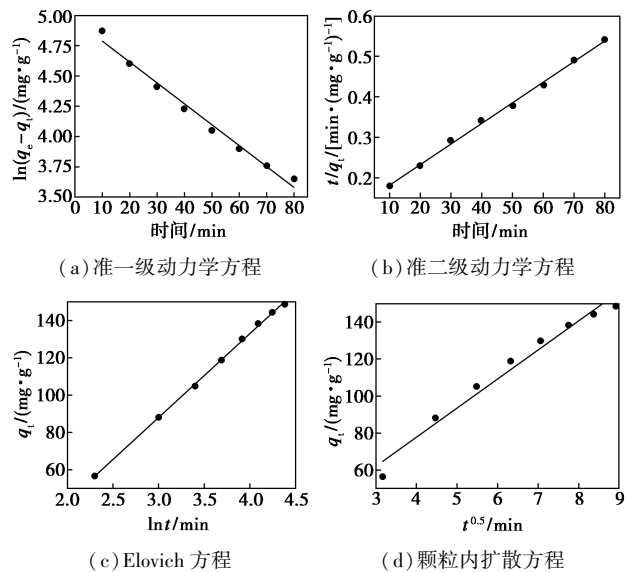


图 7 动力学方程拟合曲线

从表 7 可以看出,准二级动力学方程拟合的相关指数  $R^2$  为 0.999 5,平均偏差  $P$  为 0.87%,且由准二级动力学方程计算出的平衡吸附量  $q_e$  与实验测

定值  $q_{\text{实验}}$  较为接近,说明 PAC 对榨菜废水中 COD 的吸附作用可以用准二级动力学方程来描述,该吸附过程属于化学吸附<sup>[22]</sup>。Elovich 方程拟合程度也较高,表明 Elovich 方程也可用于描述 PAC 对榨菜废水中 COD 的吸附动力学,该过程为复杂的非均相扩散过程<sup>[23]</sup>。

表 7 动力学拟合参数

方程	参数	结果
准一级动力学方程	$k_1/\text{min}$	0.0172
	$q_{\text{实验}}/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	187.27
	$q_e/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	142.34
	$R^2$	0.9856
	$P/\%$	41.08
准二级动力学方程	$k_2/(\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1})$	$2.04\times 10^{-4}$
	$q_e(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	196.08
	$R^2$	0.9995
	$P/\%$	0.87
Elovich 方程	$k_3$	44.936
	$R^2$	0.9994
	$P/\%$	0.51
	颗粒内扩散方程	$k_p/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-0.5})$
$R^2$		0.9750
$P/\%$		4.40

注: $q_t$  为  $t$  时刻平衡吸附量; $k_1$  为准一级吸附速率常数; $k_2$  为准二级吸附速率常数; $k_3$  为 Elovich 动力学吸附速率常数; $k_p$  为颗粒内扩散速率常数; $P$  为平均偏差。

### 3 结论

(1)以城市污水处理厂脱水污泥为原料,钛白废酸为活化剂,采用化学活化法制备 PAC 的最佳参数为:固液比为 1:3,炭化时间为 75 min,炭化温度为 350℃。由正交实验得出影响钛白废酸制备污泥活性炭吸附性能的主次顺序为炭化温度>炭化时间>固液比。制得的 PAC 碘吸附值为 406.40 mg/g,比表面积为 753.76 m<sup>2</sup>/g,总孔容为 0.475 7 cm<sup>3</sup>/g,含氧官能团质量摩尔浓度为 1.653 0 mmol/g。

(2)将该 PAC 用于榨菜废水的处理,当投加量为 15 g/L,pH 为中性,振荡时间为 120 min 时,榨菜废水中 COD 和 TP 的去除率分别为 73.6% 和 99.1%。说明将钛白废酸作为活化剂制备的 PAC 具有较强的吸附能力,在工业废水处理领域应用前景广阔。

(3)该 PAC 对榨菜废水中 COD 的吸附符合 Langmuir 等温模型和准二级动力学与 Elovich 方程。

### 参考文献

[1] 住房和城乡建设部.关于 2016 年第一季度全国城镇污水处理

设施建设和运行情况的通报[EB/OL].[2016-6-8].[http://www.360doc.com/content/16/0713/20/30612782\\_575283221.shtml](http://www.360doc.com/content/16/0713/20/30612782_575283221.shtml).

- [2] 西南石油大学.一种利用钛白废酸制备污泥活性炭的方法:中国,201710163677.0[P].2017-06-13.
- [3] 王家宏,张迪,尹小龙,等.污泥活性炭的制备及其对酸性红 G 的吸附行为[J].环境工程学报,2015,9(1):58-64.
- [4] 魏先勋,翟云波,曾光明,等.城市污水处理厂污泥资源化利用技术进展[J].环境工程学报,2003,4(10):10-13.
- [5] 张祖康.污水处理场废渣的减量和资源化[J].石油化工环境保护,2000,(3):1-5.
- [6] 何莹,舒威,廖俊峰,等.污泥-秸秆基活性炭的制备及其对渗滤液 COD 的吸附[J].环境工程学报,2015,9(4):1663-1669.
- [7] 覃理嘉,王东波,林荣科,等.Fenton 活化制备污泥炭对水中 Cr(VI)的吸附性能[J].环境工程学报,2017,11(9):5007-5012.
- [8] Inguanzo M, Menéndez J A, Fuente E, et al. Reactivity of pyrolyzed sewage sludge in air and CO<sub>2</sub>[J]. Journal of Analytical & Applied Pyrolysis, 2001, 58(58-59): 943-954.
- [9] Tay J H, Chen X G, Jeyaseelan S, et al. Optimising the preparation of activated carbon from digested sewage sludge and coconut husk[J]. Chemosphere, 2001, 44(1): 45-51.
- [10] Li W H, Yue Q Y, Gao B Y, et al. Preparation of sludge-based activated carbon made from paper mill sewage sludge by steam activation for dye wastewater treatment[J]. Desalination, 2011, 278(1-3): 179-185.
- [11] Tao H C, Zhang H R, Li J B, et al. Biomass based activated carbon obtained from sludge and sugarcane bagasse for removing lead ion from wastewater[J]. Bioresource Technology, 2015, 192: 611-617.
- [12] Li Y, Li Y, Li L, et al. Preparation and analysis of activated carbon from sewage sludge and corn stalk[J]. Advanced Powder Technology, 2016, 27(2): 684-691.
- [13] Rozada F, Calvo L F, García A I, et al. Dye adsorption by sewage sludge-based activated carbons in batch and fixed-bed systems[J]. Bioresource Technology, 2003, 87(3): 221-230.
- [14] Martin M J, Artola A, Balaguer M D, et al. Activated carbons developed from surplus sewage sludge for the removal of dyes from dilute aqueous solutions[J]. Chemical Engineering Journal, 2003, 94(3): 231-239.
- [15] Rio S, Faurbrasquet C, Le C L, et al. Experimental design methodology for the preparation of carbonaceous sorbents from sewage sludge by chemical activation-application to air and water treatments[J]. Chemosphere, 2005, 58(4): 423-437.
- [16] 阮林叶.钛白废酸回收技术研究[D].上海:华东理工大学,2011.
- [17] 李航,张太亮,吕利平.钛白废酸耦合 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 制备芬顿试剂对剩余污泥的减量研究[J].现代化工,2017(7):109-112.
- [18] 范兵,李志广,李昭,等.硫酸法钛白废酸的处理[J].河南化工,2013,30(3,4):12-15.
- [19] 孙伟.水解酸化—SBR—混凝工艺处理榨菜废水试验研究[D].济南:山东建筑大学,2009.
- [20] 周健,曾朝银,龙腾锐,等.高盐高氮榨菜废水生物脱氮试验研究[J].环境科学学报,2005,25(12):1636-1640.
- [21] 曾朝银.高盐高氮高有机浓度榨菜废水脱氮除磷技术试验研究[D].重庆:重庆大学,2005.
- [22] Aksu Z. Determination of the equilibrium, kinetic and thermodynamic parameters of the batch biosorption of nickel(II) ions onto *Chlorella vulgaris*[J]. Process Biochemistry, 2002, 38(1): 89-99.
- [23] 成芳芳,孔庆山,纪全,等.海藻酸纤维对水溶液中 Fe<sup>3+</sup> 的吸附动力学研究[J].合成纤维工业,2010,33(2):1-4. ■