

改性活性炭吸附咪唑类离子液体的效果

张鹏, 赵瑰施, 张玲, 郑寿荣* (南京大学环境学院, 江苏南京 210000)

摘要 [目的]通过氧化处理提高活性炭吸附量。[方法]活性炭的表面化学性质可以直接影响活性炭对离子液体的吸附,采用过氧化氢、硝酸、过硫酸铵氧化活性炭(F300),改变其表面的官能团含量,合成过氧化氢改性活性炭(HF300)、硝酸改性活性炭(NF300)、过硫酸铵改性活性炭(SF300),研究其对氯化1-丁基-3-甲基咪唑(Bmimcl)和氯化1-辛基-3-甲基咪唑(Omimcl)的吸附影响。[结果]HF300、NF300、SF300表面的含氧官能团显著增加;HF300、NF300、SF300中SF300对含亲水性阳离子的Bmimcl的吸附效果最佳且提升最为显著,吸附容量由TF300的0.19 mmol/g增加到0.29 mmol/g;HF300、NF300、SF300对含疏水性阳离子的Omimcl的吸附无明显变化。SF300对Bmimcl和Omimcl的吸附均符合Freundlich模型;SF300对Bmimcl和Omimcl的吸附符合准二级动力学,Bmimcl在SF300上的准二级动力学速率常数为0.016 3 g/(mg·min),Omimcl在SF300上的准二级动力学速率常数为0.002 2 g/(mg·min)。无机阳离子(Na⁺, Ca²⁺)会抑制SF300对Bmimcl和Omimcl的吸附,且Ca²⁺的抑制效果强于Na⁺。SF300对Bmimcl和Omimcl的吸附量随pH的升高呈现出先升高后变低的变化趋势,对Bmimcl和Omimcl的吸附量分别在pH=7和5时达到最大。[结论]氧化处理可以提高活性炭的吸附量。

关键词 离子液体;活性炭;表面改性;吸附

中图分类号 X 131.2 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)19-0069-04

Effect of Modified Activated Carbon on Adsorption of Imidazole Ionic

ZHANG Peng, ZHAO Gui-shi, ZHANG Ling, ZHENG Shou-rong* (School of Environment, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210000)

Abstract [Objective]The aim was to improve the activated carbon adsorption. [Method]Surface chemical properties can directly affect the adsorption of imidazole ionic liquid on activated carbon. In order to change the surface functional groups, HF300, NF300, SF300 was synthesized by oxidation of activated carbon using hydrogen peroxide, nitric acid and ammonium persulfate. The adsorption of 1-butyl-3-methylimidazolium chloride (Bmimcl) and 1-octyl-3-methylimidazolium chloride (Omimcl) was studied on HF300, NF300, SF300. [Result]The results showed that modification by surface oxidation led to markedly increased contents of O-containing functional groups in HF300, NF300 and SF300. In comparison with other modified activated carbons, SF300 exhibited higher adsorption capacity and more marked promotion in the adsorption of Bmimcl. The adsorption capacity increased from 0.19 mmol/L on TF300 to 0.29 mmol/L on SF300. However, HF300, NF300, SF300 exhibited nearly identical adsorption for Omimcl. The adsorption isotherms of Bmimcl and Omimcl on SF300 could be well described using the Freundlich model. The adsorption of Bmimcl and Omimcl well followed pseudo-second order kinetics, with kinetic rate constant of 0.016 3 g/(mg·min) and 0.0022 g/(mg·min), respectively. Coexisting cation (Na⁺, Ca²⁺) inhibited Bmimcl and Omimcl adsorption, and Ca²⁺ effect was stronger than Na⁺. Bmimcl and Omimcl adsorption on SF300 was highly dependent on pH, and the higher adsorption amounts were observed at pH 7 and 5, respectively. [Conclusion]Oxidation can improve the adsorption capacity of activated carbon.

Key words Ionic liquid; Activated carbon; Surface modification; Adsorption

离子液体具有物理化学性质可调、导电性强、结构稳定等优良特性^[1],被广泛应用于化学化工、分离分析及功能材料方面。随着对离子液体的深入研究,逐渐发现离子液体对生物、细胞、植物和高等动物具有潜在的毒性^[2-5],目前对含离子液体废水的常见处理方法包括化学降解、生物降解及吸附法^[6-8]。吸附法由于其简便、绿色和可再生的优点,是最常用的离子液体去除方法。活性炭是一种优良的吸附剂,但其吸附效率和吸附容量受到物理结构和表面化学性质的影响,为进一步提高活性炭的吸附性能可以进行物理结构改性^[9]或表面化学性质改性^[10]。笔者采用过氧化氢、硝酸、过硫酸铵氧化剂对活性炭进行氧化处理,提高活性炭表面的含氧官能团,并以改性后的活性炭吸附亲水性较强的氯化1-丁基-3-甲基咪唑(Bmimcl)和疏水性较强的1-辛基-3-甲基咪唑(Omimcl),研究改性活性炭对亲水性和疏水性离子液体的吸附行为。

1 材料与方

1.1 试验材料 氯化1-丁基-3-甲基咪唑(Bmimcl,美国

Sigma-Aldrich公司),氯化1-辛基-3-甲基咪唑(Omimcl,美国Sigma-Aldrich公司),煤质活性炭(Filtrisorb 300,简称F300,美国Calgon公司),过氧化氢、硝酸、过硫酸铵均为分析纯。

1.2 吸附剂的制备与表征

1.2.1 吸附剂的制备^[11-13]。高温碳化F300:为消除活性炭固有官能团的影响,需要对F300进行碳化处理,以去除其表面官能团,将F300置于管式炉中,氮气保护下以5℃/min的速度升温到850℃,保持5h,冷却至室温,标记为TF300。

过氧化氢氧化TF300:圆底烧瓶中加入20 mL浓度为30%的过氧化氢和1.2 g TF300,磁力搅拌24 h,去离子水洗至中性,80℃烘干24 h,标记为HF300。

硝酸氧化TF300:圆底烧瓶中加入100 mL 6 mol/L的硝酸和1.5 g TF300,75℃下回流4 h,冷却至室温后,去离子水洗至中性,80℃烘干24 h,标记为NF300。

过硫酸铵氧化TF300:取39.935 g过硫酸铵和一定量2 mol/L硫酸,稀释至100 mL,转移至烧瓶中,加入2 g TF300,磁力搅拌24 h,去离子水洗至中性,80℃烘干24 h,标记为SF300。

1.2.2 吸附剂的表征。吸附剂孔结构参数及比表面积分析采用孔分析仪;傅里叶变换红外光谱分析采用Nexus 870型

基金项目 国家自然科学基金项目(21577056)

作者简介 张鹏(1992—),男,河北衡水人,硕士研究生,研究方向:环境功能材料。*通讯作者,教授,博士,博士生导师,从事环境功能材料研究。

收稿日期 2017-04-21

红外光谱仪;活性炭表面官能团种类及含量测定采用 Boehm 酸碱滴定法。

1.3 吸附试验

1.3.1 吸附等温线。取吸附剂 TF300、HF300、NF300、SF300 各 10 mg,加入 40 mL 0.02 mol/L NaCl 背景液,加入 Bmimcl 和 Omimcl 的甲醇储备液,再以 0.02 mol/L NaCl 背景液消除顶空体积,25 °C 恒温条件下振荡 24 h。吸附平衡后采用 0.45 μm 滤膜过滤,高效液相色谱仪(Agilent 1200, Agilent)测定溶液中 Bmimcl 和 Omimcl 的平衡浓度,采用式(1)计算吸附量,绘制吸附等温线。

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)}{M} \times V \quad (1)$$

式(1)中, q_e 为平衡吸附量(mmol/g); C_0 和 C_e 分别为吸附质(Bmimcl 和 Omimcl)的初始浓度和平衡浓度(mmol/L); M 为吸附剂质量(g); V 为溶液体积(L)。

1.3.2 吸附动力学。取 0.12 g SF300 于 500 mL 三口烧瓶中,Bmimcl 和 Omimcl 的初始浓度分别为 73.96 和 114.43 mg/L,在 25 °C 下磁力搅拌开始计时,吸附量按照式(1)计算。

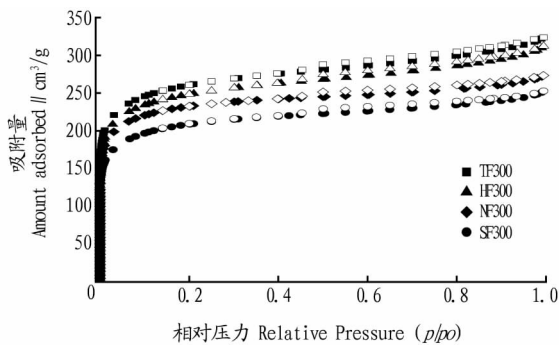
1.3.3 离子强度对吸附效果的影响。背景液分别采用 0.01、0.02、0.05、0.08、0.10 mol/L 的氯化钠和氯化钙溶液,吸附平衡 24 h,测定溶液中的离子液体浓度。

1.3.4 溶液 pH 对吸附效果的影响。以 HCl 和 NaOH 调节溶液 pH,使其平衡后的溶液 pH 分布在 2.0 ~ 10.0,吸附平衡 24 h,测定溶液中的离子液体浓度及平衡 pH。

2 结果与分析

2.1 材料表征

2.1.1 BET 分析。由图 1 可知,4 种材料以微孔为主,氮气吸附量从大到小依次为 TF300、HF300、NF300、SF300,表明过氧化氢、硝酸、过硫酸铵氧化后材料的总孔容均有减少,且减少量从大到小依次为 SF300、NF300、HF300;由图 2 可知,4 种材料的孔分布较窄。



注:实心代表吸附数据,空心代表脱附数据

Note:The solid represents the adsorption data and the hollow represents the desorption data

图 1 各吸附剂氮气吸附/脱附等温线

Fig.1 Nitrogen adsorption/desorption isotherm of each adsorbent

由表 1 可知,氧化后活性炭的比表面积、微孔面积、微孔及中孔体积相较 TF300 均有所减少,且 SF300 的减少量最大,

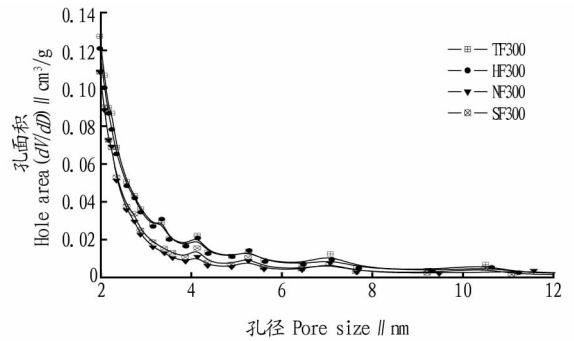


图 2 各吸附剂的孔径分布情况

Fig.2 Pore size distribution of each adsorbent

其次为 NF300、HF300 的变化量最小。孔体积和孔径的变化表明,F300 活性炭的表面及孔结构对过硫酸铵氧化处理最为敏感,因而孔结构和表面性质变化最为明显。

表 1 材料的孔结构参数

Table 1 Structural parameters of each adsorbent

吸附剂 Adsorbent	比表面积 Specific surface area (S_{BET}) m^2/g	微孔面积 Micropore area (S_{micro}) m^2/g	微孔体积 Micropore volume (V_{micro}) cm^3/g	中孔体积 Mesopore volume (V_{meso}) cm^3/g	孔体积 Pore volume (V_T) cm^3/g
TF300	841.75	521.37	0.26	0.23	0.49
SF300	672.61	415.07	0.21	0.17	0.38
NF300	746.13	491.73	0.24	0.18	0.42
HF300	801.90	496.31	0.25	0.22	0.47

2.1.2 傅里叶变换红外光谱。图 3 为 TF300、HF300、NF300、SF300 的 FT-IR 谱图,在 3 430 cm^{-1} 处的峰为 O-H 键的伸缩振动峰,且 HF300、NF300、SF300 的峰强度高于 TF300,表明氧化处理提高了表面的羟基官能团含量;NF300 和 SF300 在 1 710 cm^{-1} 处的峰为 -COOH 的振动峰,且 SF300 的峰强度高于 NF300,表明硝酸和过硫酸铵的氧化处理提高了活性炭表面的 -COOH 含量,且过硫酸铵的氧化处理效果更好;对于 1 570 cm^{-1} 处的吸收峰,目前大多数研究人员认为是由于芳香烃的伸缩振动与高度共轭氢键羰基基团的耦合而产生^[14];在波数为 1 000 ~ 1 200 cm^{-1} 的吸收峰是由大

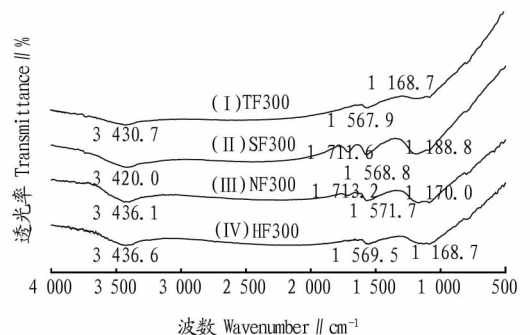


图 3 材料的 FT-IR 谱图

Fig.3 FR-IR of each adsorbent

量、宽泛的重叠峰相互重叠而产生,很多学者认为是不同结构的醚和酚羟基结构造成^[15-16]。

2.1.3 Boehm 滴定。由表 2 可知,氧化处理后活性炭的碱性

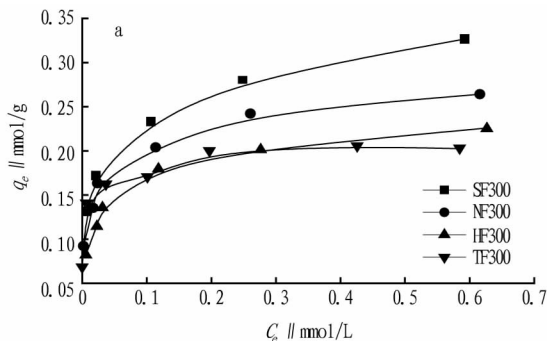
基团明显减少,酸性基团明显增加,且变化幅度从大到小依次为 SF300、NF300、HF300;HF300 的表面官能团主要以酚羟基的增加为主,NF300 和 SF300 主要以羧基和内酯基的增加为主;活性炭表面含氧官能团含量的增加使材料表面的亲水性增强,因而更易吸附亲水性污染物。

表 2 活性炭的 Boehm 滴定结果

Table 2 The result of Boehm titration on activated carbons

吸附剂 Adsorbent	表面基团含量 Surface group content // mmol/g				
	碱性基团 Basic group	酸性基团 Acidic group	酚羟基 Phenolic hydroxyl	羧基 Carboxyl	内酯基 Lactone group
TF300	0.74	0.43	0.24	0.01	0.18
HF300	0.16	0.80	0.73	0.01	0.06
NF300	0.02	1.32	0.24	0.50	0.58
SF300	0.04	1.92	0.30	1.13	0.49

2.2 吸附等温线 由图 4a 可知,氧化后 3 种材料对 Bmimcl 的吸附有显著提高,TF300 的最大吸附量为 0.19 mmol/g, SF300 的最大吸附量为 0.29 mmol/g,约有 50% 的提升,这是由于羧基和内酯基等含氧官能团可以促进活性炭与亲水性



注: a. Bmimcl. b. Omimcl

Note: a. Bmimcl. b. Omimcl

离子液体 Bmimcl 之间的氢键作用,从而提高对亲水性离子液体的吸附^[17]。这表明氧化处理可以提高材料表面的含氧官能团,从而提高吸附能力。由图 4b 可知,4 种材料对 Omimcl 的吸附量基本无差别,这主要是由于 Omimcl 的疏水性较强,与吸附剂表面的含氧官能团存在疏水作用,因此通过氧化处理很难提高吸附效果。为了进一步研究氧化后活性炭对 2 种离子液体的吸附机制,采用 Langmuir 和 Freundlich 方程[式(2)、(3)]对 TF300 和 SF300 吸附 Bmimcl 和 Omimcl 的等温线数据进行拟合,拟合结果见表 3。

Langmuir 线性方程为:

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m C_e b} + \frac{1}{q_m} \quad (2)$$

Freundlich 线性方程为:

$$\lg q_e = \frac{1}{n} \ln C_e + \lg K_f \quad (3)$$

式(2)中, q_m 为最大吸附量 (mmol/g); b 为吸附平衡常数 (L/mg);式(3)中, K_f 为 Freundlich 模型的吸附系数 (mmol¹⁻ⁿ · Lⁿ/g); n 为 Freundlich 模型的线性系数。

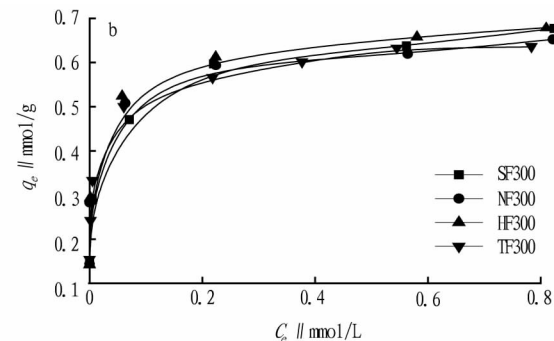


图 4 离子液体 Bmimcl 和 Omimcl 在采用不同氧化剂氧化的活性炭上的吸附等温线

Fig. 4 The adsorption isotherms of ionic liquid Bmimcl and Omimcl on activated carbon oxidized with different oxidizing agents

由表 3 可知,TF300、SF300 对 Bmimcl 和 Omimcl 的吸附等温线能够很好地用 Freundlich 模型拟合,相关系数均在 0.952 0 以上, n 的数值均大于 1,表明吸附行为属于优惠型吸附。吸附 Bmimcl 时, K_f 值由 TF300 的 0.216 2 升高到

SF300 的 0.312 7;而对于 Omimcl 的吸附, K_f 值由 TF300 的 0.700 3 升高到 SF300 的 0.739 8,变化不太明显。这表明氧化处理增加了材料对亲水性污染物的吸附亲和力。

表 3 吸附等温线的拟合结果

Table 3 Simulation results of ionic liquid adsorption isotherms

吸附质 Adsorbate	吸附剂 Adsorbent	Langmuir 模型 Langmuir model			Freundlich 模型 Freundlich model		
		b	q_m mmol/g	R^2	n	K_f mmol ¹⁻ⁿ · L ⁿ /g	R^2
Bmimcl	TF300	387.947 4	0.193 8	0.795 0	11.641 4	0.216 2	0.952 0
	SF300	235.135 3	0.250 2	0.696 4	6.447 5	0.312 7	0.957 0
Omimcl	TF300	464.500 0	0.566 5	0.933 7	6.605 0	0.700 3	0.974 8
	SF300	161.813 1	0.577 6	0.928 6	5.037 8	0.739 8	0.991 8

2.3 吸附动力学 从图 5 可见,对 Bmimcl 的吸附在 120 min 后达到表观平衡,平衡吸附量为 41.5 mg/g;对 Omimcl 的吸附在 240 min 后达到表观平衡,平衡吸附量为 123.7 mg/g。

表 4 为 SF300 的吸附动力学拟合结果,选择准一级动力学模型和准二级动力学模型进行拟合,准一级动力学模

型^[18]为

$$\lg(q_e - q_t) = \lg q_e - k_1 t / 2.303 \quad (4)$$

准二级动力学模型^[19]为:

$$t/q_t = 1/(k_2 q_e^2) + t/q_e \quad (5)$$

式(4)、(5)中, q_t 为 t 时间的吸附量, k_1 和 k_2 分别为准一级

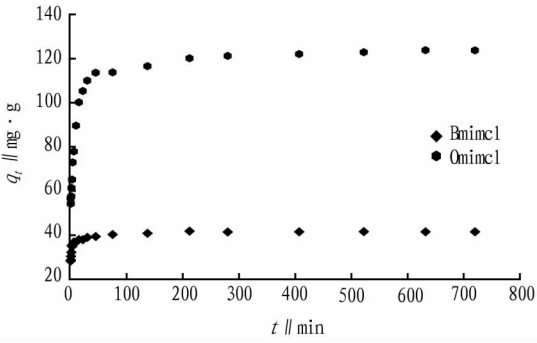


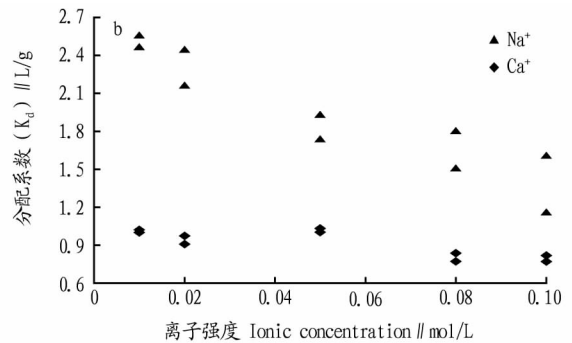
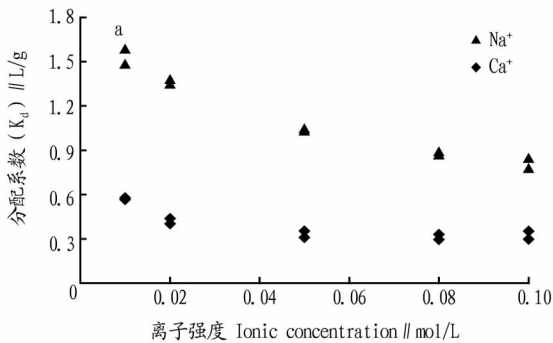
图5 离子液体 Bmimcl 和 Omimcl 在 SF300 上的吸附动力学表现
Fig. 5 The adsorption of ionic liquid Bmimcl and Omimcl on SF300

动力学和准二级动力学速率常数。

表4 离子液体 Bmimcl 和 Omimcl 在 SF300 上的动力学方程拟合结果

Table 4 Simulation results of ionic liquid Bmimcl and Omimcl adsorption kinetics on F300

吸附质 Adsorbate	一级动力学拟合 First-order kinetic fit			二级动力学拟合 Two stage kinetic fit		
	k_1 min^{-1}	q_{e1} mg/g	R^2	k_2 $\text{g}/(\text{mg} \cdot \text{min})$	q_{e2} mg/g	R^2
Bmimcl	0.003 1	4.983 1	0.612 2	0.016 3	41.322 3	0.999 5
Omimcl	0.006 3	35.974 9	0.838 7	0.002 2	123.456 8	0.999 9



注:a. Bmimcl;b. Omimcl

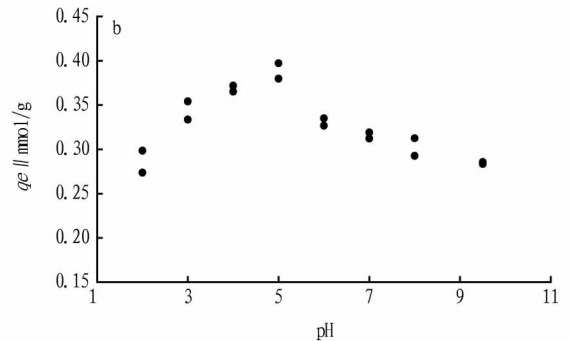
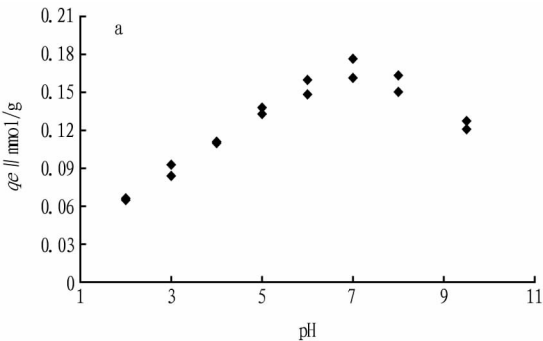
Note: a. Bmimcl;b. Omimcl

图6 不同离子强度 Na^+ 、 Ca^{2+} 对 SF300 吸附 Bmimcl 和 Omimcl 的影响

Fig. 6 Effect of ionic strength (Na^+ , Ca^{2+}) on adsorption coefficient (K_d) for Bmimcl and Omimcl on SF300

2.5 pH 对吸附的影响 由图7可知, SF300 对 Bmimcl 和 Omimcl 的吸附随着 pH 的增大呈先升高后降低的趋势, 在

pH = 7 和 5 时, 分别达到最大吸附量。这也是由于低 pH 条件下, H^+ 浓度增大, 与吸附质离子液体产生吸附竞争作用,



注:a. Bmimcl;b. Omimcl

Note: a. Bmimcl;b. Omimcl

图7 不同 pH 对 SF300 吸附 Bmimcl 和 Omimcl 影响

Fig. 7 pH Effect for Bmimcl and Omimcl adsorption on SF300

测或防治时,选择黑色粘虫板,放低悬挂高度,可以取得较好的效果。

参考文献

- [1] 石宝才,路虹,官亚军,等. 韭菜迟眼蕈蚊的识别与防治[J]. 中国蔬菜, 2010(11):21-22.
- [2] 陈栋. 韭菜迟眼蕈蚊(*Bradysia odoriphaga*)的可持续治理技术初步研究[D]. 北京:中国农业大学,2005.
- [3] 张文学,卢巧英,郭为龙,等. 不同药剂对韭菜迟眼蕈蚊幼虫的防治效果[J]. 陕西农业科学,2007(1):19-21.
- [4] 靖湘峰,雷朝亮. 昆虫趋光性及其机理的研究进展[J]. 昆虫知识,2004, 41(3):198-203.
- [5] 肖婷,刘宝生,郭建,等. 不同颜色诱虫板对草莓花蓟马的诱集作用[J]. 江苏农业科学,2011,39(1):159-160.
- [6] 周方园,王钰,赵海鹏,等. 黏虫板对葱地种蝇成虫的诱杀效果[J]. 植物保护,2012,38(3):172-175.
- [7] 慕卫,刘峰,贾忠明,等. 韭菜迟眼蕈蚊筒便人工饲养技术[J]. 华东昆虫学报,2003,12(2):87-89.
- [8] 边磊. 基于远程寄生定位机理的假眼小绿叶蝉化学生态和物理调控[D]. 北京:中国农业科学研究院,2014.

(上接第72页)

从而抑制了离子液体在 SF300 表面的吸附。而随着 pH 提高至碱性条件,离子液体的吸附量降低,这可能是由于碱性条件下,吸附剂的表面含氧官能团发生了去质子化,而使溶液中的离子液体丢失了一部分吸附位点所致。对比 Bmimcl 和 Omimcl 在不同 pH 条件下的吸附变化,pH 对 Bmimcl 在 SF300 上的吸附影响明显强于 Omimcl,这也表明 Bmimcl 的吸附主要是与表面含氧官能团的作用,因而受 pH 的影响较大。与之相反,官能团在 Omimcl 吸附过程中的作用并不大,因而 pH 对其在 SF300 上的吸附影响不明显。

3 结论

(1)相较于 TF300, HF300, NF300, SF300 的含氧官能团含量有明显提升(主要为 NF300 和 SF300),NF300 和 SF300 对亲水性 Bmimcl 的吸附效果有显著提升,对疏水性较强的 Omimcl 吸附效果无显著影响。这表明氧化处理能够增加含氧官能团的数量,提高活性炭对亲水性污染物的吸附性能,且过硫酸铵的提升效果最为显著。

(2)SF300 对 Bmimcl 和 Omimcl 的吸附等温线符合 Freundlich 模型,吸附动力学符合准二级动力学模型。

(3)无机阳离子会抑制 SF300 对 Bmimcl 和 Omimcl 的吸附效果,且 Ca^{2+} 的抑制效果强于 Na^+ 。

(4)pH 是影响吸附效果的重要因素,SF300 对 Bmimcl 和 Omimcl 的吸附效果随 pH 的升高呈先升高后降低的趋势,分别在 pH 为 7 和 5 时达到最大吸附量。

参考文献

- [1] 纪开吉,杨杰,岳群峰. 介孔硅 SBA-15 对水溶液中咪唑基离子液体的吸附性能研究[J]. 化学工程师,2014,28(11):72-75.
- [2] DOCHERTY K M. Toxicity and antimicrobial activity of imidazolium and pyridinium ionic liquids[J]. Green chemistry,2005,7(4):185-189.
- [3] RANKER J, MÖLTER K, STOCKA F, et al. Biological effects of imidazolium ionic liquids with varying chain lengths in acute *Vibrio fischeri* and WST-1 cell viability assays[J]. Ecotoxicology and environmental safety, 2004,58(3):396-404.
- [4] LATAŁA A, STEPNOWSKI P, NĘDZI M, et al. Marine toxicity assessment of imidazolium ionic liquids: Acute effects on the Baltic algae *Oocystis submarina* and *Cyclotella meneghiniana*[J]. Aquatic toxicology,2005,73(1):

- [9] 管致和,吴福祯. 中国农业百科全书:昆虫卷[M]. 北京:农业出版社, 1990:343.
- [10] 王洪涛,宋朝凤,王英姿. 韭菜迟眼蕈蚊成虫对不同颜色的趋性及黄色黏虫板的诱杀效果[J]. 江苏农业科学,2015,43(6):133-134.
- [11] SCHOONHOVEN M L, VAN LOON J J A, DICKE M. Insect-plant biology[M]. 2nd ed. New York:Oxford University Press,2005.
- [12] 马晓丹,李朝霞,薛明,等. 韭菜迟眼蕈蚊成虫诱杀技术研究[J]. 中国植保导刊,2013(12):33-36.
- [13] BRISCOE A D, BERNARD G D, SZETO A S, et al. Not all butterfly eyes are created equal: Rhodopsin absorption spectra, molecular identification, and localization of ultraviolet-, blue-, and green-sensitive rhodopsin-encoding mRNAs in the retina of *Vanessa cardui*[J]. The journal of comparative neurology,2003,458(4):334-349.
- [14] PROKOPY R J, OWENS E D. Visual detection of plants by herbivorous insects[J]. Annual review of entomology,1983,28(1):337-364.
- [15] 尹怀富,王秀峰. 韭蛆的发生及防治研究进展[J]. 中国植保导刊,2005(8):11-13.
- [16] 赵省三,周庆奎,赵鹰,等. 韭蛆的防治研究[J]. 天津农学院学报, 2001,8(2):6-11.

- [5] BERNOT R J, KENNEDY E E, LAMBERTI G A. Effects of ionic liquids on the survival, movement, and feeding behavior of the freshwater snail, *Physa acuta*[J]. Environmental toxicology and chemistry,2005,24(7):1759-1765.
- [6] STEPNOWSKI P, ZALESKA A. Comparison of different advanced oxidation processes for the degradation of room temperature ionic liquids[J]. Journal of photochemistry photobiology A-chemistry,2005,170(1):45-50.
- [7] NEUMANN J, CHO C W, STEUDTE S, et al. Biodegradability of fluoroorganic and cyano-based ionic liquid anions under aerobic and anaerobic conditions[J]. Green chemistry,2012,14(2):410-418.
- [8] REINERT L, BATOUCHE K, LÉVÉQUE J M, et al. Adsorption of imidazolium and pyridinium ionic liquids onto montmorillonite: Characterization and thermodynamic calculations[J]. Chemical engineering journal,2013, 209(41):13-19.
- [9] 梁霞,王学江. 活性炭改性方法及其在水处理中的应用[J]. 水处理技术,2011,37(8):1-6.
- [10] AKSOYLU A E, FARIA J L, PEREIRA M F R, et al. Highly dispersed activated carbon supported platinum catalysts prepared by OMCVD: A comparison with wet impregnated catalysts[J]. Applied Catalysis A General, 2003,243(2):357-365.
- [11] BAZUŁA P A, LU A H, NITZ J J, et al. Surface and pore structure modification of ordered mesoporous carbons via a chemical oxidation approach [J]. Microporous and mesoporous materials,2008,108(1/2/3):266-275.
- [12] PRADHAN B K, SANDLE N K. Effect of different oxidizing agent treatments on the surface properties of activated carbons[J]. Carbon,1999,37(8):1323-1332.
- [13] MORENO-CASTILLA C, FERRO-GARCIA M A, JOLY J P, et al. Activated carbon surface modifications by nitric-acid, hydrogen-peroxide, and ammonium peroxydisulfate treatments[J]. Langmuir,1995,11(11):4386-4392.
- [14] FANNING P E, VANNICE M A. A DRIFTS study of the formation of surface groups on carbon by oxidation[J]. Carbon,1993,31(5):721-730.
- [15] GÓMEZ-SERRANO V, ACEDO-RAMOS M, LÓPEZ-PEINADO A J, et al. Oxidation of activated carbon by hydrogen peroxide. Study of surface functional groups by FT-IR[J]. Fuel,1994,73(3):387-395.
- [16] PAINTER P, STARSINIC M, COLEMAN M. Fourier transform infrared spectroscopy[M]. New York:Academic Press,1985:169-189.
- [17] LEMUS J, PALOMAR J, HERAS F, et al. Developing criteria for the recovery of ionic liquids from aqueous phase by adsorption with activated carbon[J]. Separation and purification technology,2012,97(36):11-19.
- [18] TRIVEDI H C, PATEL V M, PATEL R D. Adsorption of cellulose triacetate on calcium silicate[J]. European polymer journal,1997,9(6):525-531.
- [19] HO Y S, MCKAY G. Pseudo-second order model for sorption processes [J]. Process biochemistry,1999,34(5):451-465.