

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第5期

Vol.34 No.5

**2013**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

基于过氧化物的消毒技术研究进展 ..... 刁海玲,赵三平,周文 (1645)

环境损害评估:国际制度及对中国的启示 ..... 张红振,曹东,於方,王金南,齐霖,贾倩,张天柱,骆永明 (1653)

不同国家基于健康风险的土壤环境基准比较研究与启示 ..... 徐猛,颜增光,贺萌萌,张超艳,侯红,李发生 (1667)

蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化技术在有机废弃物处理应用中的研究进展 ..... 张志剑,刘萌,朱军 (1679)

基于生态分区的我国湖泊营养盐控制目标研究 ..... 刁晓君,席北斗,何连生,邓祥征,吴锋,王鹏腾 (1687)

我国东北地区地表水酸化现状 ..... 徐光仪,康荣华,罗遥,段雷 (1695)

西安市对渭河水质的影响分析 ..... 于婕,李怀恩 (1700)

极端干旱水文年(2011年)夏季珠江口溶解氧的分布特征及影响因素研究 ..... 叶丰,黄小平,施震,刘庆霞 (1707)

应用相平衡分配法建立湘江衡阳段沉积物重金属质量基准 ..... 韩超南,秦延文,郑丙辉,张雷,曹伟 (1715)

长江口海域底栖生态环境质量评价——AMBI和M-AMBI法 ..... 蔡文倩,孟伟,刘录三,朱延忠,周娟 (1725)

温州城市降雨径流中BOD<sub>5</sub>和COD污染特征及其初始冲刷效应 ..... 王骏,毕春娟,陈振楼,周栋 (1735)

影响悬浮颗粒物吸收系数测量的相关因素研究 ..... 余小龙,沈芳,张晋芳 (1745)

香溪河库湾春季pCO<sub>2</sub>与浮游植物生物量的关系 ..... 袁希功,黄文敏,毕永红,胡征宇,赵玮,朱孔贤 (1754)

紊流脉动强度对藻类生长及水环境的影响研究 ..... 雷雨,龙天渝,伞磊,安强,黄宁秋 (1761)

高铁酸钾对水中藻类及其次生臭味污染物二甲基三硫醚同步去除研究 ..... 马晓雁,张泽华,王红宇,胡仕斐,李青松 (1767)

纳米Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>非均相Fenton反应催化氧化邻苯二酚 ..... 何洁,杨晓芳,张伟军,王东升 (1773)

水中萘普生的紫外光降解机制及其产物毒性研究 ..... 马杜娟,刘国光,吕文英,姚锬,周丽华,谢成屏 (1782)

酸活化赤泥催化臭氧氧化降解水中硝基苯的效能研究 ..... 康雅凝,李华楠,徐冰冰,齐飞,赵伦 (1790)

镉污染应急处置含镉絮体稳定性实验研究 ..... 柳王荣,魏清伟,杨仁斌,许振成,曾东 (1797)

基于光学在线监测及形态学研究的絮凝体强度分析方法 ..... 金鹏康,冯永宁,王宝宝,王晓昌 (1802)

不同电子供体下三氯苯酚的还原脱氯机制研究 ..... 王金泉,胡梦蝶,马邕文,黄明智 (1808)

壳聚糖季铵盐磁性颗粒的制备及其对甲基橙的吸附效果 ..... 张璐璐,胡筱敏,英诗颖,王芳 (1815)

城市污水二级出水超滤膜污染与膜特性的研究 ..... 孟晓荣,张海珍,王磊,王旭东,赵亮 (1822)

倒置A<sup>2</sup>/O-MBR处理城市污水的中试研究 ..... 张健君,邹高龙,杨淑芳,丁星,王莉,毛乾庄,杨丹 (1828)

不同电子供体的硫自养反硝化脱氮实验研究 ..... 袁莹,周伟丽,王晖,何圣兵 (1835)

短程同步硝化反硝化过程的脱氮与N<sub>2</sub>O释放特性 ..... 梁小玲,李平,吴锦华,王向德 (1845)

基于固相萃取的水中多种有毒有害有机污染物富集方法优化 ..... 张明全,李锋民,吴乾元,胡洪营 (1851)

多环麝香污染胁迫对蚯蚓特异性蛋白基因表达的影响 ..... 陈春,刘潇威,郑顺安,周启星,李松 (1857)

浙江省制药行业典型挥发性有机物臭氧产生潜力分析及健康风险评价 ..... 徐志荣,王浙明,许明珠,何华飞 (1864)

苯系物光催化开环降解产物低级醛类的健康效应 ..... 赵伟荣,廖求文,杨亚楠,戴九松 (1871)

四川妇女血清中多溴联苯醚的浓度水平与组成特征 ..... 邵敏,陈永亨,李晓宇 (1877)

咪唑类离子液体毒性的QSAR/QSPR研究 ..... 赵继红,赵永升,张宏忠,张香平 (1882)

宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征 ..... 樊新刚,米文宝,马振宁,王婷玉 (1887)

内蒙古包头白云鄂博矿区及尾矿区周围土壤稀土污染现状和分布特征 ..... 郭伟,付瑞英,赵仁鑫,赵文静,郭江源,张君 (1895)

福建省重点城市路面尘负荷及化学组成研究 ..... 郑桢,杨冰玉,吴水平,王新红,陈晓秋 (1901)

重金属污染场地电阻率法探测数值模拟及应用研究 ..... 王玉玲,能昌信,王彦文,董路 (1908)

丛枝菌根真菌对稀土尾矿中大豆生长和稀土元素吸收的影响 ..... 郭伟,赵仁鑫,赵文静,付瑞英,郭江源,张君 (1915)

海洋细菌N3对几种赤潮藻的溶藻效应 ..... 史荣君,黄洪辉,齐占会,胡维安,田梓杨,戴明 (1922)

1株分离自煤矿废水的铁硫氧化细菌LY01的鉴定及其氧化特性研究 ..... 刘玉娇,杨新萍,王世梅,梁银 (1930)

1株苯并[a]芘高效降解菌的筛选与降解特性 ..... 蔡瀚,尹华,叶锦韶,常晶晶,彭辉,张娜,何宝燕 (1937)

2,2',4,4'-四溴联苯醚的好氧微生物降解 ..... 张姝,Giulio Franco,李晓豹,卢晓霞,侯珍,杨君君 (1945)

养猪废水培养微生物絮凝剂产生菌群B-737及发酵特性 ..... 裴瑞林,信欣,张雪乔,周迎芹,姚力,羊依金 (1951)

1997~2011年北京市空气中酸性物质与降水组分变化趋势的相关性分析 ..... 陈圆圆,田贺忠,杨懂艳,邹本东,鹿海峰,林安国 (1958)

黄山降水酸度及电导率特征分析 ..... 石春娥,邓学良,吴必文,洪杰,张苏,杨元建 (1964)

夏季黄山不同高度大气气溶胶水溶性离子特征分析 ..... 文彬,银燕,秦彦硕,陈魁 (1973)

广州秋季灰霾污染过程大气颗粒物有机酸的污染特征 ..... 谭吉华,赵金平,段菁春,马永亮,贺克斌,杨复沫 (1982)

福建省三大城市冬季PM<sub>2.5</sub>中有机碳和元素碳的污染特征 ..... 陈衍婷,陈进生,胡恭任,徐玲玲,尹丽倩,张福旺 (1988)

上海市含碳大气颗粒物的粒径分布 ..... 袁宁,刘卫,赵修良,王广华,姚剑,曾友石,刘邃庆 (1995)

上海市浦东新区二次气溶胶生成的估算 ..... 崔虎雄,吴迺名,段玉森,伏晴艳,张懿华,王东方,王茜 (2003)

沙尘暴期间上海市大气颗粒物元素地球化学特征及其物源示踪意义 ..... 钱鹏,郑祥民,周立旻 (2010)

厦门秋季近郊近地面CO<sub>2</sub>浓度变化特征研究 ..... 李燕丽,穆超,邓君俊,赵淑惠,杜可 (2018)

GC-MS和GC-ECD同时在线观测本底大气中的HCFC-142b ..... 郭立峰,姚波,周凌晔,李培昌,许林 (2025)

城市居家环境空气真菌群落结构特征研究 ..... 方治国,欧阳志云,刘芄,孙力,王小勇 (2031)

城市污水处理厂挥发性芳香烃的气味指纹及定量评价研究 ..... 郭薇,王伯光,唐小东,刘舒乐,何洁,张春林 (2038)

内河多点分散码头大气污染叠加影响特征 ..... 刘建昌,李兴华,徐洪磊,程金香,王忠岱,肖杨 (2044)

义马煤中铅的热稳定性及转化行为研究 ..... 刘瑞卿,王钧伟 (2051)

基于能源消费情景模拟的北京市主要大气污染物和温室气体协同减排研究 ..... 谢元博,李巍 (2057)

《环境科学》征订启事(1652) 《环境科学》征稿简则(1789) 信息(1807,1821,1881,1987) 专辑征稿通知(1863)

# 壳聚糖季铵盐磁性颗粒的制备及其对甲基橙的吸附效果

张聪璐<sup>1,2</sup>, 胡筱敏<sup>1\*</sup>, 英诗颖<sup>2</sup>, 王芳<sup>2</sup>

(1. 东北大学资源与土木工程学院, 沈阳 110004; 2. 沈阳药科大学制药工程学院, 沈阳 110016)

**摘要:** 首先在甘氨酸盐酸盐离子液体([Gly]Cl)水溶液中制备了不同取代度的壳聚糖季铵盐, 采用共沉淀法制备了纳米 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . 进而以 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 为核, 戊二醛作交联剂, 通过反相悬浮法制备交联壳聚糖季铵盐磁性颗粒, 考察了反应条件对吸附效果的影响. 并采用静态吸附法研究了磁性颗粒对甲基橙(MO)的吸附效果. 结果表明, 在 $25^\circ\text{C}$ ,  $\text{pH}=3$ 的条件下, 甲基橙初始浓度从 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 $150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 平衡吸附量从 $37.45\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 增加到 $277.5\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ . 运用相关数学模型拟合实验数据得出, 该吸附符合 Freundlich 模型, 吸附动力学符合拟二级动力学模型. 经4次重复使用后磁性颗粒对甲基橙的吸附率仍高于90%.

**关键词:** 磁性; 壳聚糖季铵盐; 反相悬浮法; 甲基橙; 吸附

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)05-1815-07

## Preparation of Magnetic Quaternary Chitosan Salt and Its Adsorption of Methyl Orange from Water

ZHANG Cong-lu<sup>1,2</sup>, HU Xiao-min<sup>1</sup>, YING Shi-ying<sup>2</sup>, WANG Fang<sup>2</sup>

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. School of Pharmaceutical Engineering, Shenyang Pharmaceutical University, Shenyang 110016, China)

**Abstract:** First, quaternary chitosan salts with different substitution degrees were prepared in glycine hydrochloride ([Gly]Cl) ionic liquid. Nano-sized  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  powder was obtained through chemical co-precipitation method. And then, magnetic quaternary chitosan particles were prepared through inverse suspension cross-linking using  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  as the nucleus and glutaraldehyde as the cross-linking agent. The influence of different reaction conditions on adsorption was discussed. Adsorption of methyl orange (MO) by magnetic quaternary chitosan particles was studied through the static adsorption method. The results showed that at  $\text{pH} 3.0$  and  $25^\circ\text{C}$  the adsorption capacity varied from  $37.45\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  to  $277.5\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  with the MO concentration ranging from  $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  to  $150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . The adsorption isotherm was fitted to the Freundlich model and the adsorption kinetics was fitted to the pseudo-second order kinetic isotherms capacity experiment. It was found that after the adsorbent was used for four times, its removal rate still exceeded 90%.

**Key words:** magnetic; quaternary chitosan salt; inverse suspension method; methyl orange; adsorption

印染废水具有水量大、有机污染物含量高、碱性大、水质变化大等特点, 属难处理的工业废水之一. 目前在化学、物理和生物等各种处理方法中, 吸附以其高效、操作简单、低成本、低能耗等特点被认为是最实用的技术之一<sup>[1~3]</sup>. 壳聚糖是甲壳素的N-脱乙酰基产物, 具有良好的生物相容性、无毒性和生物可降解性等特点<sup>[4]</sup>, 由于壳聚糖分子中具有大量的羟基、氨基等功能基团, 因此可用作吸附剂、絮凝剂等新型水处理材料<sup>[5~8]</sup>, 在印染废水处理方面也有一定的应用<sup>[9~12]</sup>. 壳聚糖作为吸附材料在实际应用中存在容易流失、机械强度低、不能再生等缺点, 从而限制了其广泛应用<sup>[13,14]</sup>. 将壳聚糖以及改性后的壳聚糖与磁性物质结合并交联, 在一定程度上既保留了壳聚糖优良的吸附性能, 又赋予了吸附材料一定的机械强度、抗酸碱性和磁响应性, 便于分离和回收<sup>[15~18]</sup>. 壳聚糖季铵盐是壳聚糖的重要衍生物, 属阳离子型聚合物, 能够有效地去除

水中阴离子有害物质. 目前对于磁性壳聚糖季铵盐的制备仅有少量研究<sup>[19]</sup>, 但是将其应用于阴离子染料的吸附还尚未见报道.

本研究以 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 为核, 戊二醛作交联剂, 通过反相悬浮法制备交联壳聚糖季铵盐磁性颗粒, 分析了磁性颗粒对甲基橙(MO)的吸附性能, 以期为其今后在工业废水处理中的应用奠定理论基础.

### 1 材料与方法

#### 1.1 试验材料

壳聚糖(脱乙酰度 > 90%, 国药试剂); 2,3-环氧丙基三甲基氯化铵(山东东营国丰精细化工厂,

收稿日期: 2012-08-16; 修订日期: 2012-11-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178088); 辽宁省教育厅科学研究项目(L2012361)

作者简介: 张聪璐(1977~), 女, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为水处理材料, E-mail: twyla666@sina.com

\* 通讯联系人, E-mail: hxmin\_jj@163.com

纯度 95%); 甘氨酸(天津市博迪化工有限公司), 其余试剂、浓盐酸、浓氨水、液体石蜡、Span 80、戊二醛、石油醚等均为市售, 分析纯, 未作进一步处理, 直接使用. 所有溶液均使用高纯水配制.

### 1.2 壳聚糖季铵盐的制备

根据文献[20]合成甘氨酸盐酸盐离子液体([Gly]Cl). 将 0.5 g 壳聚糖溶于质量分数为 1% 的甘氨酸盐酸盐离子液体的水溶液中, 搅拌溶解至均相, 得到透明的淡黄色黏液. 将 2,3-环氧丙基三甲基氯化铵(EPTAC)溶液缓慢滴加上述溶液中. 30℃ 反应 4 h, 用 3 倍体积的丙酮沉淀, 分离. 沉淀物再用丙酮洗涤 3~5 次, 45℃ 干燥至恒重. 改变反应物配比获得不同取代度的壳聚糖季铵盐 CS/EPTAC, 产物取代度采用电导滴定法测定<sup>[21]</sup>.

### 1.3 纳米Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>磁性颗粒的制备

Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>采用共沉淀法制备. 按照摩尔比 Fe<sup>3+</sup>: Fe<sup>2+</sup> = 1:1, 准确称取一定量 FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O 和 FeCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O溶于 50 mL 蒸馏水中. 在氮气保护和搅拌条件下逐滴加入 1.5 mol·L<sup>-1</sup>氨水, 至体系 pH 达到 9~10, 后升温到 80℃, 晶化 0.5 h. 用磁场分离得到黑色磁粉, 用大量的蒸馏水洗至中性, 45℃ 真空干燥 24 h.

### 1.4 壳聚糖季铵盐磁性颗粒的制备

将一定量的 CS/EPTAC 溶于 20 mL 蒸馏水中, 按照一定摩尔配比加入纳米 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, 超声分散 15 min 后加入 50 mL 液体石蜡, 一定量 Span 80, 振荡 0.5 h, 形成均一乳液后, 加入戊二醛, 60℃ 恒温反应 4 h, 离心分离, 用石油醚充分洗涤固体, 再分别用无水乙醇、蒸馏水洗涤数次, 45℃ 真空干燥, 得到黑色壳聚糖季铵盐磁性颗粒 CS/EPTAC/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>.

### 1.5 样品表征

Bruker 公司 IFS55 傅里叶变换红外光谱仪; 日本 Shimadzu 公司 TGA-50 型热失重分析仪; 日本岛津公司 SSX-550 扫描电子显微镜; 美国 Quantum Design 公司 MPMS-7 磁性测量系统.

### 1.6 壳聚糖季铵盐磁性颗粒对甲基橙的吸附性能研究

取浓度分别为 20~150 mg·L<sup>-1</sup>的甲基橙溶液 50 mL 置于一系列 150 mL 三角瓶中, 加入 0.02 g CS/EPTAC/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, 放入恒温振荡器中, 在 25℃ ± 1℃ 温度下, 以 150 r·min<sup>-1</sup> 频率振荡, 定时取样测定吸光度. 分别按照式(1)、(2)和(3)计算瞬时吸附量、平衡吸附量和 MO 去除率.

$$Q_t = (c_0 - c_t) V/m \quad (1)$$

$$Q_e = (c_0 - c_e) V/m \quad (2)$$

$$R = (c_0 - c_t)/c_0 \times 100\% \quad (3)$$

式中,  $Q_t$ 、 $Q_e$  分别为瞬时吸附容量和平衡吸附量, mg·g<sup>-1</sup>;  $R$  为染料去除率, %;  $c_0$ 、 $c_t$ 、 $c_e$  分别为染料初始浓度、吸附过程溶液中染料的瞬时浓度、吸附平衡时溶液中染料的浓度, mg·L<sup>-1</sup>;  $V$  为吸附体积, L;  $m$  为吸附剂用量, g.

## 2 结果与分析

### 2.1 CS/EPTAC/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>磁性颗粒制备条件优化

#### 2.1.1 CS/EPTAC 取代度对吸附效果的影响

保持其它条件不变, Span 80 3 mL, 交联剂 3 mL, CS/EPTAC 与 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 的摩尔比为 2:1, 选用取代度为 0~1.42 的季铵盐制备吸附剂, 在 pH=3 的条件下, 对 80 mg·L<sup>-1</sup> 的 MO 进行吸附, 结果见图 1. 从中可知, 随着取代度的增加, 吸附剂初始吸附速率较快, 平衡吸附容量也逐渐增大. 这是由于壳聚糖季铵盐本身是阳离子化壳聚糖, 取代度越高阳离子浓度越大, 对 MO 的吸附容量也就越大.

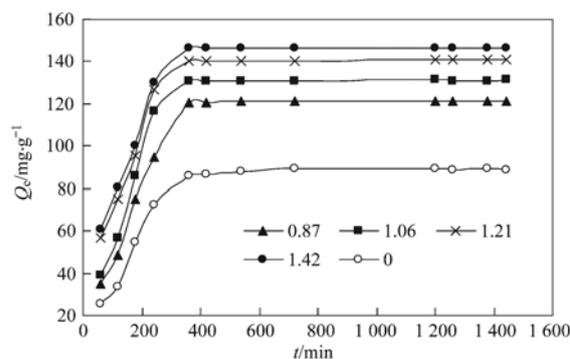


图 1 季铵盐不同取代度对吸附效果的影响

Fig. 1 Effect of substitution degree of quaternary chitosan salt on adsorption

#### 2.1.2 不同 Span 80 量对吸附效果的影响

Span 80 作为乳化剂加入是为了获得稳定的乳液. 乳化剂分子会在油水的界面上形成界面膜, 界面上的作用力越大, 界面越厚, 膜强度就越大, 乳液体系就越稳定, 反之则不稳定. 乳化剂的存在降低了油水液面间的表面能, 从能量角度维持了这个体系的稳定<sup>[22]</sup>. 保持其它条件不变, 交联剂 3 mL, CS/EPTAC 取代度 1.42, CS/EPTAC 与 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 的摩尔比为 2:1, 考察不同 Span 80 量对材料吸附效果的影响, 结果见图 2. 在乳化剂加入量范围内, 平衡吸附量差别不大, 但是初始吸附速率在低加入量(1 mL)的情况下较低; 当加入量大于 3 mL 时, 后处理过程中溶液过于黏稠, 洗涤困难, 且颗粒有黏连现象. 实

验中 Span 80 为 3 mL 获得的吸附剂较理想.

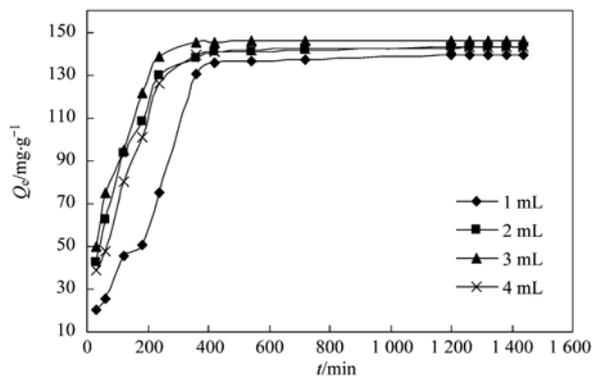


图 2 不同 Span 80 量对吸附效果的影响  
Fig. 2 Effect of mass of Span 80 on adsorption

### 2.1.3 不同戊二醛量对吸附效果的影响

保持其它条件不变, 3 mL Span 80, CS/EPTAC 取代度 1.21, CS/EPTAC 与  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的摩尔比 2:1, 考察不同交联剂量对材料吸附效果的影响, 结果见图 3. 结果表明, 戊二醛用量太少时交联不完全, 影响其抗酸碱能力; 交联剂过多, 会造成交联过度, 颗粒间互相黏连. 实验中, 戊二醛加入量为 3 mL 时吸附效果较好.

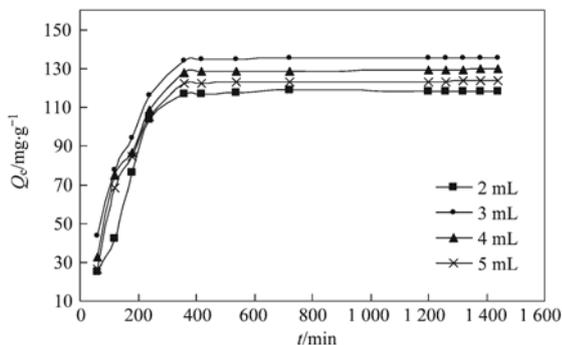


图 3 不同戊二醛量对吸附效果的影响  
Fig. 3 Effect of mass of glutaraldehyde on adsorption

### 2.1.4 壳聚糖季铵盐与 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 的摩尔比对吸附效果的影响

保持其它条件不变, Span 80 3 mL, 交联剂 3 mL, CS/EPTAC 取代度 1.42, 考察 CS/EPTAC 与  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的摩尔比对材料吸附效果的影响. 由图 4 可以看出,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的量对于吸附剂吸附甲基橙具有明显的影响. 在研究比例范围内, 当 CS/EPTAC 与  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的摩尔比为 2:1 ~ 3:1 时, 吸附剂具有较高的吸附容量; 当摩尔比等于 1 时, 虽然有研究表明<sup>[23]</sup>, 在  $\text{pH} < 4$  条件,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  在溶液中的表面优势组分是  $(\text{FeOH}_2)^+$ , 利于吸附, 但可能由于壳聚糖不能将

$\text{Fe}_3\text{O}_4$  完全包裹起来, 在一定程度上造成颗粒团聚, 影响了吸附效果; 当摩尔比例大于或等于 4, 在制备过程中, 由于壳聚糖季铵盐的性质, 溶液会变得黏稠, 流动性差, 影响  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的分散以及乳化效果.

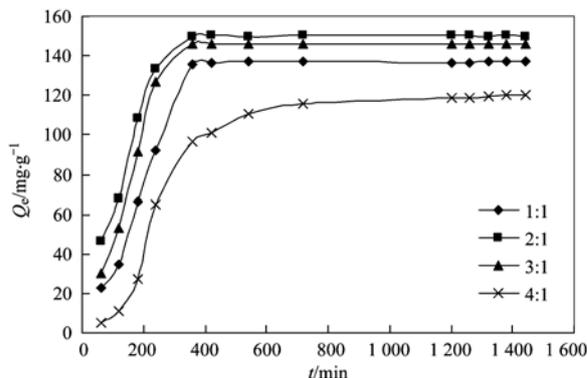


图 4 不同季铵盐与  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的摩尔比比对吸附效果的影响  
Fig. 4 Effect of molar ratio of quaternary chitosan salt and  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  on adsorption

### 2.2 样品表征

CS/EPTAC/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的 SEM 形貌如图 5 所示. 可以看出, CS/EPTAC/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$  颗粒基本为球形和类球形, 粒径大小在 300 nm 左右. 另外, 粒子之间有团聚现象, 这可能是由于在粒子的制备分离过程中采用磁场分离, 使得粒子产生一定程度磁化, 造成粒子团聚.

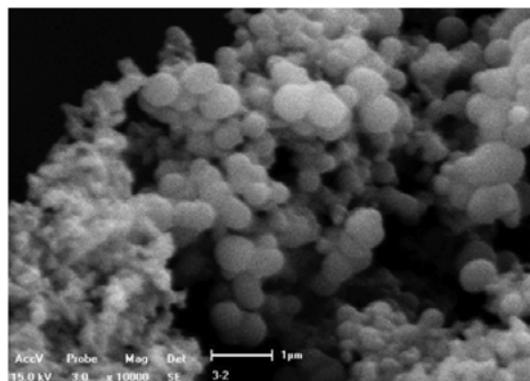
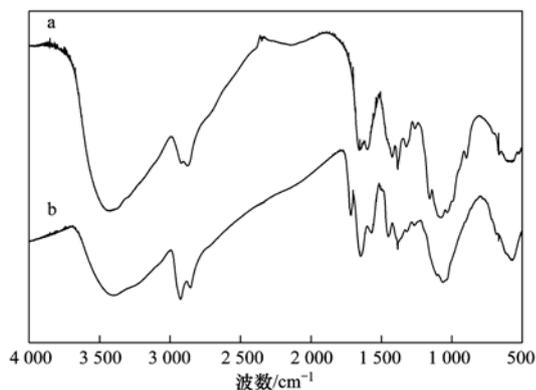
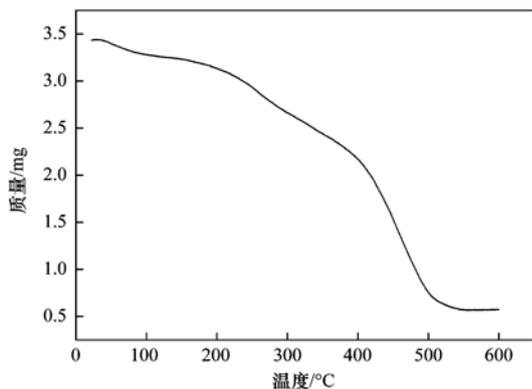


图 5 CS/EPTAC/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$  颗粒的扫描电镜  
Fig. 5 SEM image of CS/EPTAC/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$

图 6 给出了 CS、CS/EPTAC/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的 FTIR 谱图. 比较两条曲线, CS 与 CS/EPTAC/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的 FTIR 基本相似. 曲线 a 中壳聚糖  $1568 \text{ cm}^{-1}$  左右的 N—H 的变形振动峰在曲线 b 中消失, 而在  $1645 \text{ cm}^{-1}$ 、 $2930 \text{ cm}^{-1}$  附近出现了两个新的吸收峰, 它们分别对应季铵基团的  $-\text{CH}_3$  的变形振动峰和  $-\text{CH}$  的伸缩振动峰, 曲线 b 中  $570 \text{ cm}^{-1}$  为  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的 Fe—O 伸缩振动吸收峰, 说明  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  稳定地包埋在颗粒内部.

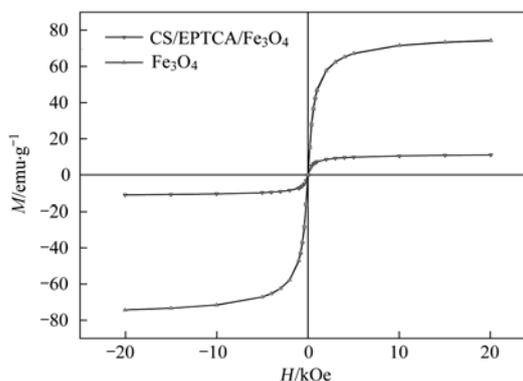
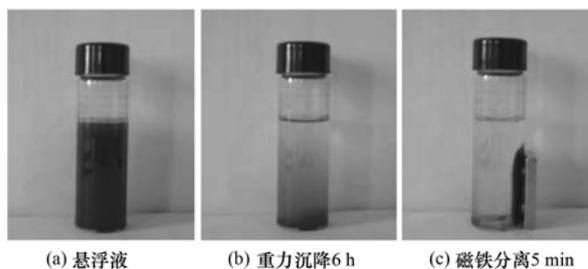
a. CS; b. CS/EPTAC/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>图 6 CS 和 CS/EPTAC/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 的红外光谱图Fig. 6 FTIR spectrum of CS and CS/EPTAC/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>

为进一步证实聚合物在磁性粒子的表面,对材料进行热重损失表征,结果见图 7. 从室温到 200℃ 左右, TGA 曲线变化较慢, 表示磁性材料表面吸附的水分蒸发所致; 从 200 ~ 500℃, 为包覆 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 的有机物热分解产生的质量损失; 从 500 ~ 600℃, TGA 曲线基本保持平稳, 表示为 N<sub>2</sub> 保护下不分解的磁性 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>.

图 7 CS/EPTAC/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 粒子的 TGA 曲线Fig. 7 TGA curve of CS/EPTAC/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>

磁性能是磁性吸附剂使用的重要因素. 图 8 给出了 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 和 CS/EPTAC/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 的饱和磁化强度曲线. 从中看出, CS/EPTAC/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 的饱和磁化强度为 11.04 emu·g<sup>-1</sup>, 与纯 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 的饱和磁化强度 74.3 emu·g<sup>-1</sup> 相比有所降低, 这主要是由于 CS/EPTAC/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 中只有部分 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, 壳聚糖季铵盐与 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 配合过程中的电子交换作用会削弱饱和磁化强度<sup>[24]</sup>. 但是 CS/EPTAC/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 仍具有良好的磁性能.

图 9 为 CS/EPTAC/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 分散于水溶液、重力沉降 6 h、以及在外磁场作用下的溶液状态. 重力沉降 6 h, 悬浮液仍然存在浑浊, 而在外加磁场的作

图 8 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 和 CS/EPTAC/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 粒子的 VSM 图Fig. 8 VSM of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and CS/EPTAC/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>

(a) 悬浮液 (b) 重力沉降 6 h (c) 磁铁分离 5 min

图 9 CS/EPTAC/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 的不同分离过程Fig. 9 Various separation processes of CS/EPTAC/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>

用下, 悬浮液中的颗粒迅速移向磁铁方向, 5 min 后溶液澄清, 说明了材料能够足磁分离的需要.

### 2.3 pH 对吸附效果的影响

分别取 50 mL 浓度为 40 mg·L<sup>-1</sup> MO 溶液进行两组实验, 调节 pH 为 2、3、4、5、6、7、8、9、10, 各组分别加入质量相同, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 配比相同的 CS/EPTAC/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (取代度为 1.42) 和 CS/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 颗粒, 25℃ ± 1℃ 进行吸附实验, 结果见图 10. 相对于未季铵化的壳聚糖磁性颗粒, 改性后的磁性颗粒能够在较宽的 pH 范围内吸附 MO, 且吸附率优于壳聚糖磁性颗粒. CS/EPTAC/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 在 pH 3 ~ 6 的范围内, 均有良好的吸附效果, 其中 pH = 3 时吸附效果最佳, 去除率达到 95.6%. 分析原因主要是在低 pH 条件下, 季铵盐基团易带正电荷, 有利于与 MO 发生作用; 在强酸性条件下 (pH = 2), 吸附效果较差, 并出现明显解吸现象; 当 pH > 7 时, 去除率均小于 10%; 当 pH = 10 时几乎没有吸附发生. 因此吸附等温线和吸附动力学实验均在 pH = 3 条件下进行.

### 2.4 吸附动力学及吸附等温线

#### 2.4.1 吸附动力学

用最佳条件下制备的吸附剂进行吸附实验. 图 11 为 25℃ 条件下磁性颗粒对不同初始浓度的甲基

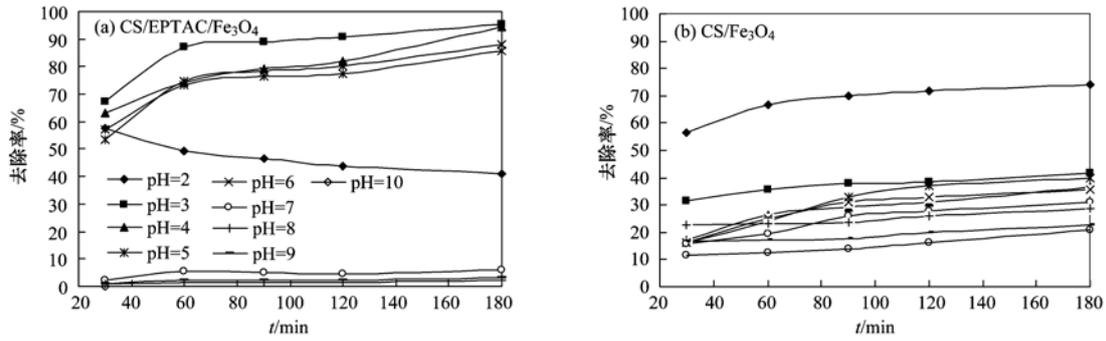


图 10 pH 值对吸附效果的影响

Fig. 10 Effect of pH on adsorption

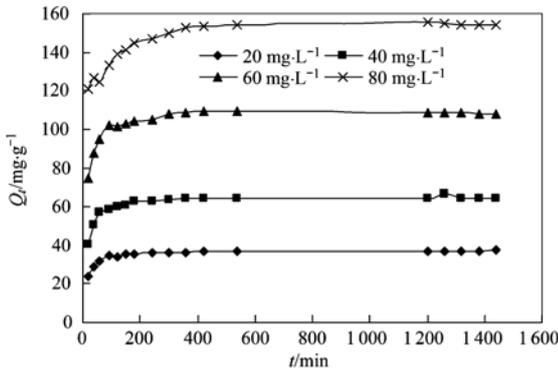


图 11 不同初始浓度甲基橙在磁性颗粒上的吸附动力学曲线

Fig. 11 Adsorption kinetics of methyl orange onto magnetic microspheres at different initial concentration

橙溶液的吸附动力学曲线. 从中可以看出吸附剂对甲基橙的吸附, 基本在 3 h 内速度最快, 吸附量随着时间的增长而上升, 反应 6 h 后吸附完全平衡.

为了研究吸附过程的动力学, 更好地揭示吸附规律, 采用拟一级动力学模型[式(4)]和拟二级动力学模型[式(5)]进行拟合.

$$\lg(Q_e - Q_t) = -\frac{K_1 t}{2.303} + \lg Q_e \quad (4)$$

$$\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{Q_e} t + \frac{1}{K_2 Q_e^2} \quad (5)$$

式中,  $K_1$  为拟一级动力学常数;  $K_2$  为拟二级动力学常数. 拟合后的相关动力学参数见表 1.

表 1 拟一级、拟二级反应动力学参数的比较

Table 1 Comparison of the first-order and second-order adsorption rate parameters

$c_0/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$Q'_e/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	拟一级			拟二级		
		$K_1 \times 10^3/\text{min}^{-1}$	$Q_e/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	$R^2$	$K_2 \times 10^3/\text{g}\cdot(\text{mg}\cdot\text{min})^{-1}$	$Q_e/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	$R^2$
20	37.45	5.99	8.01	0.769 2	2.77	37.14	0.999 8
40	64.17	6.45	16.98	0.871 4	1.27	66.22	0.999 8
60	108.07	10.59	30.39	0.970 0	0.83	111.11	0.999 9
80	154.15	7.14	41.55	0.983 2	0.51	156.25	0.999 0

由表 1 可以看出, 拟一级动力学拟合相关系数  $R^2$  相对较低, 且拟合的最大吸附量  $Q_e$  与实测值  $Q'_e$  相差较大. 拟二级动力学拟合相关系数较高  $R^2 > 0.999$ , 且拟合的最大吸附量与实测值基本一致, 说明该吸附过程以化学吸附为主.

2.4.2 吸附等温线

有机物在吸附剂上的吸附等温线通常用 Freundlich 方程模拟<sup>[25]</sup>. Freundlich 方程比较适用于非均质或多层吸附现象的拟合, 可用下式表示:

$$Q_e = Kc_e^{1/n} \quad (6)$$

式中,  $K$  是与吸附容量有关的常数,  $n$  是与表面非均匀程度有关或表面吸附点的能量分布有关的常数. 相关参数数据拟合结果见图 12 和表 2. Freundlich

方程拟合相关系数  $R^2$  为 0.933 4,  $1/n$  为 1.12. 由此可用 Freundlich 方程拟合甲基橙在磁性壳聚糖季铵盐上的吸附等温线, 其吸附过程呈现非均质吸附特性, 可能由于吸附剂表面特性基团分布不均所致.

表 2 Freundlich 方程拟合结果

Table 2 Fitting results of the adsorption isotherm

using Freundlich equations			
参数	$K$	$1/n$	$R^2$
数值	4.74	1.12	0.933 4

2.5 脱附再生

pH 值影响实验表明, 在  $\text{pH} = 10$  的条件下, 磁性颗粒对 MO 几乎没有吸附. 因此可以在该条件下

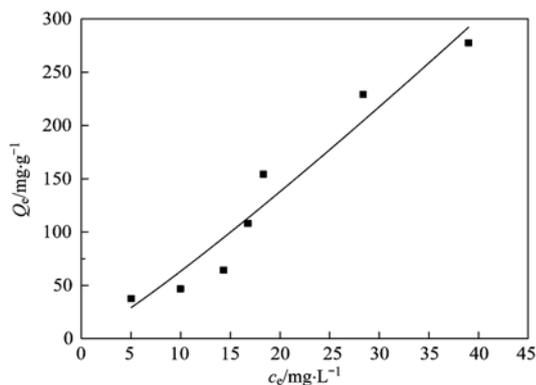


图 12 25°C条件下 Freundlich 吸附等温线

Fig. 12 Freundlich adsorption isotherm at 25°C

对吸附饱和的吸附剂进行脱附再生. 脱附再生 4 次后,对  $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的 MO 溶液的去除率分别为 95.20%、93.72%、92.50%、91.21%,且通过吸附剂质量称重未发现溶解现象. 由此可见,吸附剂经过 4 次再生之后仍保持较高的吸附效果,可循环使用.

### 3 结论

以  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  为核,戊二醛作交联剂,通过反相悬浮法成功制备了交联壳聚糖季铵盐磁性颗粒. SEM、FTIR、TGA、饱和磁化强度等测试表明,壳聚糖季铵盐包覆于  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的表面,平均粒径为 300 nm,并且具有良好的磁性. 在对 MO 的吸附研究中,磁性颗粒表现出良好的吸附能力和再生性能. 当 MO 初始浓度从  $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  增加到  $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,平衡吸附量从  $37.45 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  增加到  $277.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ . 经 4 次重复使用后磁性颗粒对 MO 的吸附率仍高于 90%.

#### 参考文献:

[ 1 ] Wang L, Wu X L, Xu W H, *et al.* Stable organic-inorganic hybrid of polyaniline/ $\alpha$ -zirconium phosphate for efficient removal of organic pollutants in water environment[J]. *Applied Materials and Interfaces*, 2012, **4**(5): 2686-2692.

[ 2 ] Fan L L, Luo C N, Sun M, *et al.* Preparation of novel magnetic chitosan/graphene oxide composite as effective adsorbents toward methylene blue[J]. *Bioresource Technology*, 2012, **114**: 703-706.

[ 3 ] Rafatullah M, Sulaiman O, Hashim R, *et al.* Adsorption of methylene blue on low-cost adsorbents: a review[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **177**(1-3): 70-80.

[ 4 ] Yan W L, Bai R B. Adsorption of lead and humic acid on chitosan hydrogel beads[J]. *Water Research*, 2005, **39**(4): 688-698.

[ 5 ] 谢燕华,李适宇,刘广立. 改性壳聚糖季铵盐的研制及其对高氯酸盐的吸附研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(9): 2537-

2542.

[ 6 ] 胡勇有,李泗清,郭艳平,等. 壳聚糖接枝三元共聚阳离子絮凝剂对高岭土悬浊液的絮凝特性[J]. *环境科学*, 2008, **29**(4): 954-959.

[ 7 ] Bratskayaa S Yu, Azarova Yu A, Matochkinab E G, *et al.* N-(2-(2-pyridyl) ethyl) chitosan: Synthesis, characterization and sorption properties[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2012, **87**(1): 869-875.

[ 8 ] Zeng D F, Wu J J, Kennedy J F. Application of a chitosan flocculant to water treatment[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2008, **71**(1): 135-139.

[ 9 ] Jiang X, Cai K, Zhang J, *et al.* Synthesis of a novel water-soluble chitosan derivative for flocculated decolorization [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **185**(2-3): 1482-1488.

[ 10 ] Rosa S, Laranjeira M C, Riela H G, *et al.* Cross-linked quaternary chitosan as an adsorbent for the removal of the reactive dye from aqueous solutions[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **155**(1-2): 253-260.

[ 11 ] Elwakeel K Z, Abd El-Ghaffar M A, EI-kousy S M, *et al.* Synthesis of new ammonium chitosan derivatives and their application for dye removal from aqueous media[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, **203**: 458-468.

[ 12 ] Gu Y X, Song P, Li T, *et al.* Synthesis and characterization of carboxymethyl-polyamine chitosan and its adsorption behavior toward a reactive dye[J]. *Carbohydrate Research*, 2011, **346**(6): 769-774.

[ 13 ] 甄豪波,胡勇有,程建华. 壳聚糖交联沸石小球对  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$  及  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附特性[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(7): 1369-1376.

[ 14 ] 黄国林,陈中胜,梁喜珍,等. 磁性交联壳聚糖对水溶液中铀(VI)离子的吸附行为[J]. *化工学报*, 2012, **63**(3): 834-840.

[ 15 ] 蔡冬梅,刘明军,孙小梅,等. 壳聚糖磁性微球对偶氮品红的吸附[J]. *中南民族大学学报(自然科学版)*, 2011, **30**(4): 36-40.

[ 16 ] Elwakeel K Z. Removal of Reactive Black 5 from aqueous solutions using magnetic chitosan resins [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **167**(1-2): 383-392.

[ 17 ] Huang G L, Zhang H Y, Shi J X, *et al.* Adsorption of Chromium (VI) from aqueous solutions using cross-linked magnetic chitosan beads [J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2009, **48**(5): 2646-2651.

[ 18 ] Zhang S, Zhou Y F, Nie W Y, *et al.* Preparation of uniform magnetic chitosan microcapsules and their application in adsorbing copper ion(II) and chromium ion(III)[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2012, **51**(43): 14099-14106.

[ 19 ] 初立秋,陈煜,苏温娟,等. 反相微乳液法制备壳聚糖季铵盐/四氧化三铁复合磁性纳米粒子[J]. *高分子材料科学与工程*, 2011, **11**(1): 39-42.

[ 20 ] 寇元,陶国宏,何玲. 氨基酸盐离子液体及其制备方法[P]. CN: 200410009958.3, 2005.06.29.

- [21] Lim S H, Samuel M H. Synthesis and antimicrobial activity of a water-soluble chitosan derivative with a fiber-reactive group[J]. Carbohydrate Research, 2004, **339**(2): 313-319.
- [22] 王怀玉,董利民,胥青峰,等. 乳化交联法制备壳聚糖微球粘连原因分析[J]. 功能材料, 2007, **38**(S1): 1923-1925.
- [23] 孙中溪,郭淑云. 纳米四氧化三铁表面酸碱性质研究[J]. 高等学校化学学报, 2006, **27**(7): 1351-1354.
- [24] Yan H, Yang L Y, Yang Z, *et al.* Preparation of chitosan/poly (acrylic acid) magnetic composite microspheres and applications in the removal of copper (II) ions from aqueous solutions[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, **229-230**: 371-380.
- [25] 王家宏,郑寿荣,刘凤玲,等. 磁性壳聚糖去除水中腐殖酸的研究[J]. 无机化学学报, 2010, **26**(10): 1761-1767.

## 关于反对个别作者一稿两投行为的联合声明

为保证所发表论文的首创性和学术严谨性,《环境科学》、《中国环境科学》、《环境科学学报》编辑部和《Journal of Environmental Sciences》编辑部特发表如下联合声明。

我们明确反对个别作者的一稿两投或变相一稿两投行为。自即日起,我们各刊在接受作者投稿时,要求论文全体作者就所投稿件作出以下承诺(附在投稿上):

1) 来稿所报道的研究成果均系全体作者的原创性研究成果,文中报道的研究成果(含图、表中数据的全部或部分)未曾发表亦未曾投其它科技期刊。

2) 在接到所投期刊编辑部关于稿件处理结果之前,所投稿件的全部或部分内容不再投其它科技期刊。

我们将认真对待作者所作的上述承诺,并建立信息共享机制,对违背上述承诺的作者(包括在文中署名的全体作者)采取联合行动。

净化学术环境、促进学术繁荣是学术期刊作者和编者的共同责任。我们诚恳地希望广大作者能够了解我们的上述立场和做法,并积极宣传和配合。

《环境科学》编辑部

《中国环境科学》编辑部

《环境科学学报》编辑部

《Journal of Environmental Sciences》编辑部

## CONTENTS

Advances in Peroxide-Based Decontaminating Technologies .....	XI Hai-ling, ZHAO San-ping, ZHOU Wen (1645)
Environmental Damage Assessment; International Regulations and Revelation to China .....	ZHANG Hong-zhen, CAO Dong, YU Fang, <i>et al.</i> (1653)
Human Health Risk-Based Environmental Criteria for Soil: A Comparative Study Between Countries and Implication for China .....	XU Meng, YAN Zeng-guang, HE Meng-meng, <i>et al.</i> (1667)
Organic Waste Treatment by Earthworm Vermicomposting and Larvae Bioconversion: Review and Perspective .....	ZHANG Zhi-jian, LIU Meng, ZHU Jun (1679)
Strategies of Nutrients Control in Lakes Based on Ecoregions of Lakes in China .....	DIAO Xiao-jun, XI Bei-dou, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (1687)
Current Status of Surface Water Acidification in Northeast China .....	XU Guang-yi, KANG Rong-hua, LUO Yao, <i>et al.</i> (1695)
Impact Analysis of Xi'an to the Water Quality of Weihe River .....	YU Jie, LI Huai-en (1700)
Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Its Affecting Factors in the Pearl River Estuary During the Summer of the Extremely Drought Hydrological Year 2011 .....	YE Feng, HUANG Xiao-ping, SHI Zhen, <i>et al.</i> (1707)
Application of Equilibrium Partitioning Approach to Establish Sediment Quality Criteria for Heavy Metals in Hengyang Section of Xiangjiang River .....	HAN Chao-nan, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (1715)
Assessing the Benthic Ecological Status in Yangtze River Estuary Using AMBI and M-AMBI .....	CAI Wen-qian, MENG Wei, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (1725)
Pollution Load and the First Flush Effect of BOD <sub>5</sub> and COD in Urban Runoff of Wenzhou City .....	WANG Jun, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1735)
Influencing Factors in Measuring Absorption Coefficient of Suspended Particulate Matters .....	YU Xiao-long, SHEN Fang, ZHANG Jin-fang (1745)
Relationship Between pCO <sub>2</sub> and Algal Biomass in Xiangxi Bay in Spring .....	YUAN Xi-gong, HUANG Wen-min, BI Yong-hong, <i>et al.</i> (1754)
Effects of Turbulent Fluctuation Intensity on the Growth of Algae and Water Environment .....	LEI Yu, LONG Tian-yu, SAN Lei, <i>et al.</i> (1761)
Simultaneous Removal of Algae and Its Odorous Metabolite Dimethyl Trisulfide in Water by Potassium Ferrate .....	MA Xiao-yan, ZHANG Ze-hua, WANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1767)
Catalyzed Oxidation of Catechol by the Heterogeneous Fenton-like Reaction of Nano-Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> System .....	HE Jie, YANG Xiao-fang, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1773)
Photodegradation of Naproxen in Aqueous Systems by UV Irradiation: Mechanism and Toxicity of Photolysis Products .....	MA Du-juan, LIU Guo-guang, LÜ Wen-ying, <i>et al.</i> (1782)
Catalytic Ozonation of Nitrobenzene in Water by Acidification-activated Red Mud .....	KANG Ya-ning, LI Hua-nan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1790)
Experimental Studies on Stability of Floes from Cadmium Pollution Emergency Treatment .....	LIU Wang-rong, GUO Qing-wei, YANG Ren-bin, <i>et al.</i> (1797)
Evaluation of Floc Strength Based on Morphological Analysis and Optical Online Monitoring .....	JIN Peng-kang, FENG Yong-ning, WANG Bao-bao, <i>et al.</i> (1802)
Mechanism of Reductive Dechlorination of Trichlorophenol with Different Electron Donors .....	WAN Jin-quan, HU Meng-die, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (1808)
Preparation of Magnetic Quaternary Chitosan Salt and Its Adsorption of Methyl Orange from Water .....	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, YING Shi-ying, <i>et al.</i> (1815)
Membrane Fouling by Secondary Effluent of Urban Sewage and the Membrane Properties .....	MENG Xiao-rong, ZHANG Hai-zhen, WANG Lei, <i>et al.</i> (1822)
Treatment of Municipal Wastewater Using the Combined Reversed A <sup>2</sup> /O-MBR Process .....	ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, YANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1828)
Study on Sulfur-based Autotrophic Denitrification with Different Electron Donors .....	YUAN Ying, ZHOU Wei-li, WANG Hui, <i>et al.</i> (1835)
Nitrogen Removal and N <sub>2</sub> O Emission Characteristics During the Shortcut Simultaneous Nitrification and Denitrification Process .....	LIANG Xiao-ling, LI Ping, WU Jin-hua, <i>et al.</i> (1845)
Optimization of Solid-Phase Extraction for Enrichment of Toxic Organic Compounds in Water Samples .....	ZHANG Ming-quan, LI Feng-min, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (1851)
Polycyclic Musks Exposure Affects Gene Expression of Specific Proteins in Earthworm <i>Eisenia fetida</i> .....	CHEN Chun, LIU Xiao-wei, ZHENG Shun-an, <i>et al.</i> (1857)
Health Risk Assessment and Ozone Formation Potentials of Volatile Organic Compounds from Pharmaceutical Industry in Zhejiang Province .....	XU Zhi-rong, WANG Zhe-ming, XU Ming-zhu, <i>et al.</i> (1864)
Health Effect of Volatile Aldehyde Compounds in Photocatalytic Oxidation of Aromatics Compounds .....	ZHAO Wei-rong, LIAO Qiu-wen, YANG Ya-nan, <i>et al.</i> (1871)
Compositions and Distribution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in Serum of Women from Sichuan Province .....	SHAO Min, CHEN Yong-heng, LI Xiao-yu (1877)
QSAR/QSPR for Predicting the Toxicity of Imidazolium Ionic Liquids .....	ZHAO Ji-hong, ZHAO Yong-sheng, ZHANG Hong-zhong, <i>et al.</i> (1882)
Spatial and Temporal Characteristics of Heavy Metal Concentration of Surface Soil in Hebin Industrial Park in Shizuishan Northwest China .....	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning, <i>et al.</i> (1887)
Distribution Characteristic and Current Situation of Soil Rare Earth Contamination in the Bayan Obo Mining Area and Baotou Tailing Reservoir in Inner Mongolia .....	GUO Wei, FU Rui-ying, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1895)
Road Dust Loading and Chemical Composition at Major Cities in Fujian Province .....	ZHENG An, YANG Bing-yu, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1901)
Numerical Simulation and Application of Electrical Resistivity Survey in Heavy Metal Contaminated Sites .....	WANG Yu-ling, NAI Chang-xin, WANG Yan-wen, <i>et al.</i> (1908)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Rare Earth Elements Uptake of Soybean Grown in Rare Earth Mine Tailings .....	GUO Wei, ZHAO Ren-xin, ZHAO Wen-jing, <i>et al.</i> (1915)
Algicidal Activity Against Red-tide Algae by Marine Bacterial Strain N3 Isolated from a HABs Area, Southern China .....	SHI Rong-jun, HUANG Hong-hui, QI Zhan-hui, <i>et al.</i> (1922)
Isolation, Identification and Oxidizing Characterization of an Iron-Sulfur Oxidizing Bacterium LY01 from Acid Mine Drainage .....	LIU Yu-jiao, YANG Xin-ping, WANG Shi-mei, <i>et al.</i> (1930)
Isolation of an Effective Benzo[a]pyrene Degrading Strain and Its Degradation Characteristics .....	CAI Han, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1937)
Aerobic Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether .....	ZHANG Shu, Franco Giulio, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (1945)
Piggery Wastewater Cultivating Biofloculant-Producing Flora B-737 and the Fermentation Characteristics .....	PEI Rui-lin, XIN Xin, ZHANG Xue-qiao, <i>et al.</i> (1951)
Correlation Between Acidic Materials and Acid Deposition in Beijing During 1997-2011 .....	CHEN Yuan-yuan, TIAN He-zhong, YANG Dong-yan, <i>et al.</i> (1958)
Characteristics of Precipitation pH and Conductivity at Mt. Huang .....	SHI Chun-e, DENG Xue-liang, WU Bi-wen, <i>et al.</i> (1964)
Chemical Characteristics of Water-Soluble Components of Aerosol Particles at Different Altitudes of the Mount Huang in the Summer .....	WEN Bin, YIN Yan, QING Yan-shuo, <i>et al.</i> (1973)
Pollution Characteristics of Organic Acids in Atmospheric Particles During Haze Periods in Autumn in Guangzhou .....	TAN Ji-hua, ZHAO Jing-ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (1982)
Characterization of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM <sub>2.5</sub> During the Winter in Three Major Cities in Fujian Province, China .....	CHEN Yan-ting, CHEN Jin-sheng, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1988)
Size Distribution of Carbonaceous Particulate Matter in Atmosphere of Shanghai, China .....	YUAN Ning, LIU Wei, ZHAO Xiu-liang, <i>et al.</i> (1995)
Secondary Aerosol Formation Through Photochemical Reactions Estimated by Using Air Quality Monitoring Data in the Downtown of Pudong, Shanghai .....	CUI Hu-xiong, WU Ya-ming, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (2003)
Geochemical Characteristics and Sources of Atmospheric Particulates in Shanghai During Dust Storm Event .....	QIAN Peng, ZHENG Xiang-min, ZHOU Li-min (2010)
Near Surface Atmospheric CO <sub>2</sub> Variations in Autumn at Suburban Xiamen, China .....	LI Yan-li, MU Chao, DENG Jun-jun, <i>et al.</i> (2018)
<i>In-situ</i> Measurement of Background Atmospheric HCFC-142b Using GC-MS and GC-ECD Method .....	GUO Li-feng, YAO Bo, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (2025)
Airborne Fungal Community Composition in Indoor Environments in Beijing .....	FANG Zhi-guo, OUYANG Zhi-yun, LIU Peng, <i>et al.</i> (2031)
Study on Quantification Assessment and Odor Fingerprint of Volatile Aromatic Hydrocarbons from Sewage Treatment Plant .....	GUO Wei, WANG Bo-guang, TANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (2038)
Superposition Impact Character of Air Pollution from Decentralization Docks in a Freshwater Port .....	LIU Jian-chang, LI Xing-hua, XU Hong-lei, <i>et al.</i> (2044)
Thermal Stability and Transformation Behaviors of Pb in Yima Coal .....	LIU Rui-qing, WANG Jun-wei (2051)
Synergistic Emission Reduction of Chief Air Pollutants and Greenhouse Gases Based on Scenario Simulations of Energy Consumptions in Beijing .....	XIE Yuan-bo, LI Wei (2057)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年5月15日 34卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 5 May 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行