

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第6期

Vol.36 No.6

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊春季气溶胶吸湿性分析	徐彬, 张泽锋, 李艳伟, 秦鑫, 缪青, 沈艳 (1911)
南京北郊秋冬季相对湿度及气溶胶理化特性对大气能见度的影响	于兴娜, 马佳, 朱彬, 王红磊, 严殊祺, 夏航 (1919)
南京北郊冬季霾天 PM _{2.5} 水溶性离子的污染特征与消光作用研究	周瑶瑶, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 王荔 (1926)
京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系	李梦, 唐贵谦, 黄俊, 刘子锐, 安俊琳, 王跃思 (1935)
长江三角洲地区基于喷涂工艺的溶剂源 VOCs 排放特征	莫梓伟, 牛贺, 陆思华, 邵敏, 勾斌 (1944)
贵阳酸雨中溶解态重金属质量浓度及形态分析	朱兆洲, 李军, 王志如 (1952)
北京市火葬场大气污染物排放现状及污染特征	薛亦峰, 闫静, 田贺忠, 熊程程, 李敬东, 吴晓清, 王玮, 朱家昕 (1959)
北京市燃煤锅炉烟气中水溶性离子排放特征	胡月琪, 马召辉, 冯亚君, 王琛, 陈圆圆, 何明 (1966)
燃煤电厂湿烟筒降雨成因分析	欧阳丽华, 庄焯, 刘科伟, 陈振宇, 顾鹏 (1975)
Mn-Ce/分子筛的脱汞特性研究	谭增强, 牛国平, 陈晓文, 安振 (1983)
办公室内颗粒物载带溴系阻燃剂的人体呼吸暴露	李岫雯, 曹辉, 倪宏刚 (1989)
森林生物质燃烧烟尘中的有机碳和元素碳	黄柯, 刘刚, 周丽敏, 李久海, 徐慧, 吴丹, 洪蕾, 陈惠雨, 杨伟宗 (1998)
北京市常见落叶树种叶片滞纳空气颗粒物功能	王兵, 王晓燕, 牛香, 张维康, 汪金松 (2005)
气相中乙酸乙酯光解的光子效率: 波长和催化剂的影响	方雪慧, 赵洁, 舒莉, 高永, 叶招莲 (2010)
长江口邻近海域赤潮水体浮游植物光吸收特性分析	刘洋洋, 沈芳, 李秀珍 (2019)
深圳近岸海域全氟化化合物的污染特征	刘宝林, 张鸿, 谢刘伟, 刘国卿, 王艳萍, 王鑫璇, 李静, 董炜华 (2028)
杭州西湖“香灰土”沉积物轻、重有机质组成特征及其环境意义	李静, 朱广伟, 朱梦圆, 龚志军, 许海, 杨桂军 (2038)
小清河表层沉积物重污染区重金属赋存形态及风险评价	黄莹, 李永霞, 高甫威, 徐民民, 孙博, 王宁, 杨健 (2046)
调水型水库藻类对调水氮、磷浓度与水量的响应	万由鹏, 尹魁浩, 彭盛华 (2054)
三峡库区回水区营养盐和叶绿素 a 的时空变化及其相互关系	张磊, 蔚建军, 付莉, 周川, Douglas G. Haffner (2061)
藻华聚集的环境效应: 对漂浮植物水葫芦光合作用的影响	包先明, 顾东祥, 吴婷婷, 石祖良, 刘国峰, 韩士群, 周庆 (2070)
巢湖沉积物有效磷的原位高分辨分析研究	李超, 王丹, 杨金燕, 王燕, 丁士明 (2077)
贵州施秉白云岩喀斯特区水化学和溶解无机碳稳定同位素特征	肖时珍, 蓝家程, 袁道先, 王云, 杨龙, 敖向红 (2085)
长沙地区不同水体稳定同位素特征及其水循环指示意义	李广, 章新平, 张立峰, 王跃峰, 邓晓军, 杨柳, 雷超桂 (2094)
元阳梯田水源区土壤水氢氧同位素特征	张小娟, 宋维峰, 吴锦奎, 王卓娟 (2102)
植草沟控制道路径流污染效果的现场实验研究	黄俊杰, 沈庆然, 李田 (2109)
Fe/Cu 催化还原降解饮用水中溴氯乙腈的性能研究	丁春生, 马海龙, 傅洋平, 赵世督, 李东兵 (2116)
三维花状结构 α-FeOOH 协同 H ₂ O ₂ 可见光催化降解双氯芬酸钠	许俊鸽, 李云琴, 黄华山, 苑宝玲, 崔浩杰, 付明来 (2122)
UV/H ₂ O ₂ 降解羟苯甲酮反应动力学及影响因素	冯欣欣, 杜尔登, 郭迎庆, 李华杰, 刘翔, 周方 (2129)
钼掺杂 TiO ₂ 光催化降解全氟辛酸	刘晴, 喻泽斌, 张睿涵, 李明洁, 陈颖, 王莉, 匡瑜, 张搏, 朱有慧 (2138)
低频无极灯降解偶氮染料酸性橙 7	吴朋, 吴军, 高士祥, 孙成, 蒋正方 (2147)
纳米 Fe ₃ O ₄ /CeO ₂ -H ₂ O ₂ 非均相类 Fenton 体系对 3,4-二氯三氟甲苯的降解	孙正男, 杨琦, 纪冬丽, 郑琳 (2154)
流变相法制备包覆型 CMC-Fe ⁰ 及降解水中 TCE 的研究	樊文井, 成岳, 余淑贞, 范小丰 (2161)
Pd-Fe/石墨烯多功能催化阴极降解 4-氯酚机制研究	祁文智, 王凡, 王辉, 施钦, 逢磊, 卞兆勇 (2168)
锰氧化物改性硅藻土对苯胺的去除动力学与机制	肖少丹, 刘露, 姜理英, 陈建孟 (2175)
铅-十六烷基三甲基氯化铵改性活性炭对水中硝酸盐和磷酸盐的吸附特性	郑雯婧, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (2185)
聚(丙烯酸酰胺-二乙烯基苯)对水溶液中刚果红的吸附	张变变, 廖运文, 高和军, 王忠志, 帅超 (2195)
大型再生水厂不同污水处理工艺的能耗比较与节能途径	杨敏, 李亚明, 魏源送, 吕鑑, 郁达伟, 刘吉宝, 樊耀波 (2203)
污泥水热液化水相产物中氮元素变化规律的研究	孙衍卿, 孙震, 张景来 (2210)
不同接种污泥 ABR 厌氧氨氧化的启动特征	张海芹, 王翻翻, 李月寒, 陈重军, 沈耀良 (2216)
基于微波-过氧化氢-碱预处理的污泥水解影响因素	贾瑞来, 魏源送, 刘吉宝 (2222)
蠡河底泥中反硝化复合菌群富集及菌群结构研究	雍佳君, 成小英 (2232)
不同类型及不同浓度抗生素条件下活性污泥丝状菌种群多样性分析	王润芳, 王琴, 张红, 齐嵘 (2239)
石油降解菌的分离鉴定及 4 株芽胞杆菌种间效应	王佳楠, 石妍云, 郑力燕, 王喆, 蔡章, 刘杰 (2245)
Sheewanella oneidensis MR-1 对针铁矿的还原与汞的生物甲基化	司友斌, 孙林, 王卉 (2252)
根表铁氧化物胶膜对水稻吸收锕钍沙星的影响	马微, 鲍艳宇 (2259)
不同耕作措施对旱作夏玉米田土壤呼吸及根呼吸的影响	禄兴丽, 廖允成 (2266)
城市区域近地表灰尘及重金属沉降垂向季节变化	李晓燕, 张舒婷 (2274)
中山市农业区域土壤-农产品中邻苯二甲酸酯 (PAEs) 污染特征	李彬, 吴山, 梁金明, 梁文立, 陈桂贤, 李拥军, 杨国义 (2283)
经口摄入土壤多溴联苯醚生物可给性变化及影响因素的体外消化模拟	张云惠, 刘伟健, 程芳芳, 熊冠男, 杨笑寒, 王歆, 陶澍, 邢宝山, 刘文新 (2292)
生物炭输入对土壤本底有机碳矿化的影响	陈威, 胡学玉, 陆海楠 (2300)
改良剂对广西环江强酸铅锌污染土壤的修复作用	曾伟铨, 宋波, 袁立竹, 黄宇妃, 伏凤艳 (2306)
蒙脱石-OR-SH 复合体材料对土壤镉的钝化及机制	曾燕君, 周志军, 赵秋香 (2314)
焦岗湖湿地土地利用格局演变及区域可持续性评价	杨阳, 蔡怡敏, 白艳莹, 陈卫平, 杨秀超 (2320)

聚(丙烯酸胺-二乙烯基苯)对水溶液中刚果红的吸附

张雯雯^{1,2}, 廖运文^{1,2*}, 高和军^{1,2*}, 王忠志¹, 帅超¹

(1. 化学合成与污染控制四川省重点实验室, 南充 637009; 2. 西华师范大学应用化学研究所, 南充 637009)

摘要: 通过丙烯酸胺(AM)与二乙烯基苯(DVB)交联聚合制备聚(丙烯酸胺-二乙烯基苯)[Poly(AM-co-DVB)], 并对其物理化学性质和吸附性能进行了详细研究. 通过FT-IR、TG、SEM研究了该聚合物的结构与热稳定性, 考察了Poly(AM-co-DVB)对刚果红的吸附性能与吸附规律, 探讨了溶液pH、时间、温度对吸附过程的影响以及AM用量对聚合物吸附性能的影响. 结果表明, 在pH为7.25, 时间为3 h, Poly(AM-co-DVB)对刚果红的最大吸附容量可达319.1 mg·g⁻¹. 其吸附等温线符合Langmuir模型, 吸附动力学过程符合假二阶方程且吸附热力学表明吸附行为是自发的过程. Poly(AM-co-DVB)对刚果红具有优越的吸附性能.

关键词: 聚合物; 刚果红; 吸附; 动力学; 热力学

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)06-2195-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.06.037

Removal Congo Red from Aqueous Solution Using Poly(AM-co-DVB)

ZHANG Luan-luan^{1,2}, LIAO Yun-wen^{1,2*}, GAO He-jun^{1,2*}, WANG Zhong-zhi¹, SHUAI Chao¹

(1. Chemical Synthesis and Pollution Control Key Laboratory of Sichuan Province, Nanchong 637009, China; 2. Institute of Applied Chemistry, China West Normal University, Nanchong 637009, China)

Abstract: Poly(AM-co-DVB) was synthesized by acrylamide (AM) and divinylbenzene (DVB) via the crosslinking reaction. The microscope structure and thermal stability of Poly(AM-co-DVB) were characterized by FT-IR, SEM and TG. Congo red (CR) was used to measure the adsorptive capacity of Poly(AM-co-DVB). The effects of initial pH, contact time and temperature on the adsorption of CR on Poly(AM-co-DVB) were investigated in this work. The kinetics, equilibrium, and thermodynamics of the adsorption process were also discussed. The results showed that the maximum adsorption capacities were 319.1 mg·g⁻¹ at pH = 7.25 and contact time = 3 h. The adsorption kinetics was well fitted by a pseudo-second-order model and the adsorption isotherms agreed well with the Langmuir model. The adsorption process was spontaneous process. Above all, the adsorption capacity of Poly(AM-co-DVB) on Congo red is significant.

Key words: polymer; Congo red; adsorption; kinetics; thermodynamics

染料因成本低、性质稳定、品种多等优点被广泛应用于纺织、造纸、制药、食品等行业. 我国是一个纺织大国, 印染行业产生大量的染料废水, 将这些染料直接排放到水体环境中, 会严重污染紧缺的淡水资源. 这些染料中大部分为芳香族、稠环芳香族、杂环化合物, 这些化合物因其生物难降解, 是一种极难被处理的有机废水. 高含量的染料废水会引起皮肤过敏、发炎, 具有致癌性和致突变性, 严重危害人类健康. 此外直接排入水体的染料会导致大量水生动植物的死亡, 给生态系统造成严重的破坏^[1-3].

近年来, 人们在染料废水的处理领域进行了大量的研究工作, 其中常用的方法有溶剂萃取法^[4]、化学沉淀法^[5]、生物降解法^[6]、膜分离法^[7]、纳米过滤法^[8]、吸附法^[9]等. 其中吸附法由于其操作简单, 效率高, 成本低, 方便快捷被认为是一种有效处理染料废水的方法. 刚果红[二苯基-4,4'-二(偶氮)-1-氨基萘-4-磺酸钠]是一种基于联苯胺的阴离子二重偶氮染料, 厌氧条件下它会生成毒性更大的芳香

胺类物质^[10]. 虽然, 许多吸附剂都可以在一定程度上除去水体中的刚果红, 但是, 大多数吸附剂因其成本较高而不能在实际中得到广泛的应用, 例如多壁碳纳米管等. 因此, 寻找更加经济高效的新型吸附剂来代替传统吸附剂, 以除去废水中的刚果红是亟待需要的. 本文正是基于这一点探索研究了以廉价的AM为原料制备新型的吸附剂材料.

高分子材料由于其内容丰富, 品种繁多, 自20世纪60年代以来得到迅速发展, 已成为新技术革命发展所必不可少的关键材料. 新型高分子材料目前可分为两类: 一是新型功能高分子材料, 二是在原有高分子基础上进行功能化修饰. 而交联高分子聚合物作为一种新型功能高分子材料由于其具有可调节

收稿日期: 2014-10-11; 修订日期: 2014-12-02

基金项目: 四川省应用基础研究项目(2011JY0058)

作者简介: 张雯雯(1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为功能材料, E-mail: Zhangluanluan@yeah.net

* 通讯联系人, E-mail: Liao-yw@163.com; Hejun_gao@126.com

的有机官能团,具有高效的吸附性能,已成为近几年研究的热点. Mahmoodi 等^[11]合成了一种高分子聚季铵盐对酸盐湖蓝的吸附达到了 $2\,000\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$. Xue 等^[12]制备了一种聚丙烯金属复合材料研究了对废水中酸性红的吸附,发现其对酸性红的最大吸附达到了 $299.5\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$. 高分子吸附材料是利用高分子材料与吸附质之间的物理或化学作用,是两者发生结合作用,以实现吸附. He 等^[13]研究了 MB 在纳米纤维素上的吸附,发现吸附过程主要是通过纳米纤维素大的比表面积和孔结构,存在更多的吸附点与染料分子发生作用.

本研究通过价格低廉的丙烯酰胺(AM)与二乙烯基苯(DVB)交联聚合制备了高分子吸附剂 Poly(AM-co-DVB). 调节不同的原料比例从而达到调控高分子吸附剂的结构,寻找出优异、高效的吸附剂. 本文详细研究了 Poly(AM-co-DVB) 对模拟刚果红废水的吸附行为,以期以后研究高分子材料在吸附领域中的应用提供了必要的补充.

1 材料与方法

1.1 实验仪器与方法

仪器:紫外-可见分光光度计(日本岛津 UV-2550),扫描电镜(SEM, JEOL JEM-6510LV),热重分析(TGA-1500),红外分析(NICOLET 6700)以及集热式恒温磁力搅拌器(DF-101S 河南省予华仪器公司).

试剂:丙烯酰胺(AR, 天津),二乙烯基苯(AR, 阿拉丁),偶氮二异丁腈(AR, 阿拉丁),甲醇(AR, 科龙),刚果红(CR, AR 西亚),去离子水.

1.2 Poly(AM-co-DVB)和PDVB的制备

称取一定量的丙烯酰胺于盛有 20 mL 甲醇的圆底烧瓶中,按照一定的比例加入二乙烯基苯 $[n(\text{AM})/n(\text{DVB})\text{ 为 }4:1、6:1、8:1]$,并加入一定量的引发剂偶氮二异丁腈,室温下搅拌 0.5 h ,氮气氛围下加热至 70°C ,反应 3 h ,得到白色的 Poly(AM-co-DVB)固体. 去离子水洗涤数次, 60°C 烘干,研磨过筛(250 目),留待备用.

PDVB 的制备方法与 Poly(AM-co-DVB)类似,唯一不同的地方在于制备过程中不需要加入 AM.

1.3 吸附实验

取 2 mg 吸附剂加入到 20 mL 一定浓度的刚果红溶液中,搅拌一定时间,离心,取上层清液,用紫外-分光光度计测定残余浓度,计算 Poly(AM-co-DVB)的吸附容量:

$$q_t = \frac{(c_0 - c_t)V}{m} \quad (1)$$

式中, c_0 和 c_t 分别是初始浓度和任一时间的刚果红浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), V 为刚果红溶液的体积(L), q_t 为吸附剂对刚果红的吸附量($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$). m 为加入吸附剂的质量(g).

2 结果与分析

2.1 红外分析

图1为PDVB、Poly(AM-co-DVB)、Poly(AM-co-DVB)/CR(吸附后)、CR的红外光谱. 在PDVB的光谱中, $3\,440\text{ cm}^{-1}$ 处的峰归属于苯环上 Ar-H 的伸缩振动峰, $2\,930\text{ cm}^{-1}$ 左右处的峰归因于 $-\text{CH}_2-$ 或 $-\text{CH}-$ 中 C-H 的伸缩振动峰, $1\,660\text{ cm}^{-1}$ 处的峰为苯环骨架的特征吸收峰. 与PDVB的谱图比较,在 Poly(AM-co-DVB) 红外光谱中, $3\,440\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰明显变宽, $1\,610\text{ cm}^{-1}$ 处出现新的吸收峰,这主要是受到接入的 AM 中的 $-\text{NH}_2$ 的影响, $1\,660\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰增强是受到 AM 中 $-\text{C}=\text{O}$ 的影响. 上述结论表明 AM 与 DVB 发生聚合成功制备出交联聚合物 Poly(AM-co-DVB). 比较 Poly(AM-co-DVB), Poly(AM-co-DVB)/CR 以及 CR 的红外谱图发现, Poly(AM-co-DVB)/CR 在 $750\sim 1\,200\text{ cm}^{-1}$ 处吸收峰发生较大的变化,其归属于刚果红上的苯环特征. 由上可知刚果红已被吸附到 Poly(AM-co-DVB)上.

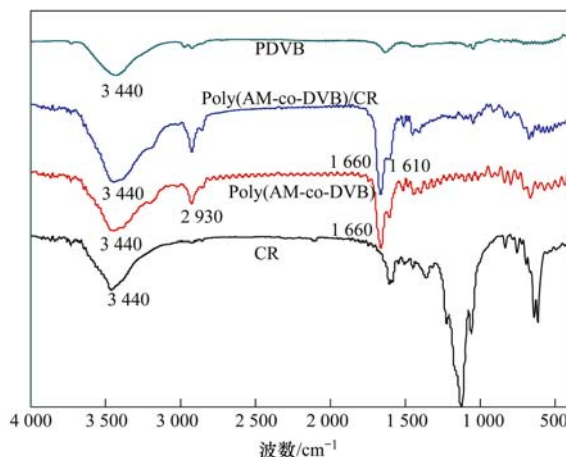


图1 4种物质的红外光谱图

Fig. 1 FT-IR spectra

2.2 热重分析

图2为3种不同比例 Poly(AM-co-DVB)和PDVB的热重分析曲线. PDVB中只有在 450°C 左右出现一个明显的质量损失,质量损失大约为

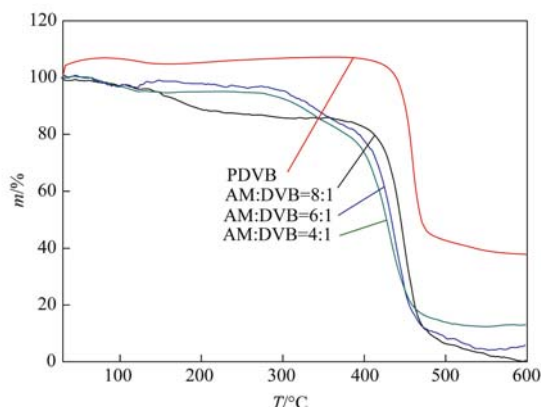


图2 4种物质的热重曲线

Fig. 2 Results of TG analysis

62%. Poly(AM-co-DVB)都在450℃出现了失重,表明交联聚合物中含有PDVB的成分。 $n(\text{AM})/n(\text{DVB}) = 8:1$ 时,62℃出现一个约为5.36%的质量损失; $n(\text{AM})/n(\text{DVB}) = 6:1$ 时在76℃存在4.01%的质量损失, $n(\text{AM})/n(\text{DVB}) = 4:1$ 时在72℃存在2.97%的质量损失.由于AM为亲水基团,随着AM含量的降低,亲水性逐渐降低,低温下含水量降低,导致质量损失逐渐减少.随着 $n(\text{AM})/n(\text{DVB})$ 比例的增加,在150~400℃区域中质量损失由3.66%上升至12.49%,表明随着投料时 $n(\text{AM})/n(\text{DVB})$ 比例的增加产物中AM含量在不断增大.

2.3 扫描电镜分析

图3为Poly(AM-co-DVB)的SEM图,从中可以看出Poly(AM-co-DVB)表面粗糙,且不均匀,存在着大量的吸附位点,为吸附刚果红分子提供有利场所.

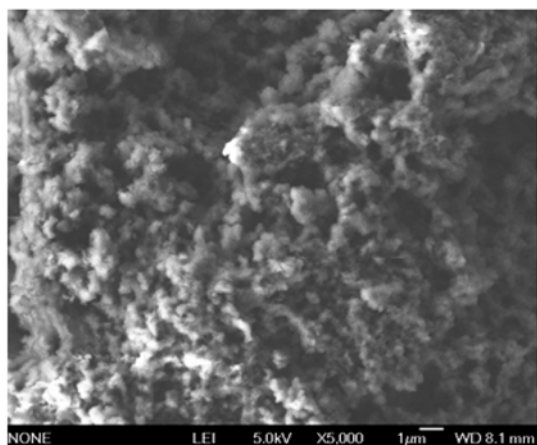
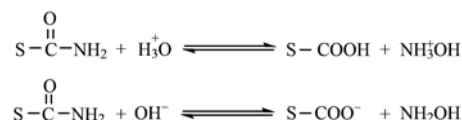


图3 Poly(AM-co-DVB)扫描电镜

Fig. 3 SEM of Poly(AM-co-DVB)

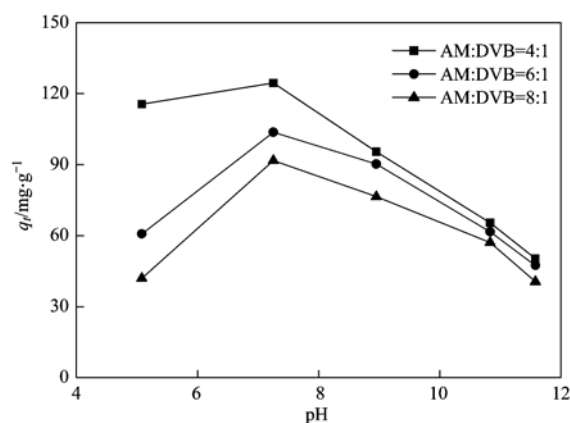
2.4 pH对吸附的影响

pH是影响吸附的重要因素,较大程度上影响溶液中电荷分布^[14].图4描述了不同pH对吸附过程的影响.由图可知随着pH的增加,吸附容量先增大后下降.在酸性和碱性溶液中Poly(AM-co-DVB)存在一定的水解平衡关系:



S为聚合物主体.从上述水解体系可知,Poly(AM-co-DVB)在酸性和碱性情况下均会一定程度上解离,产生带负电荷的表面,故而对阴离子染料分子刚果红产生静电斥力的作用,从而减小了Poly(AM-co-DVB)吸附容量.同时,随着DVB的增加,Poly(AM-co-DVB)吸附容量逐渐增加.特别是 $n(\text{AM})/n(\text{DVB}) = 4:1$ 时,Poly(AM-co-DVB)吸附容量比其余两种比例的吸附容量高许多.这表明吸附剂结构中的DVB是吸附容量提高的主要因素.随着pH的降低Poly(AM-co-DVB)对刚果红的吸附呈现先增大后减小的变化趋势.在实验范围内,对刚果红的吸附最适pH是7.25.

由图5可知:吸附过程存在两个阶段,前180 min为快速的吸附过程;延长吸附时间,吸附量不再发生明显的变化,吸附达到平衡,吸附平衡时间为3 h.25℃下,3种不同比例吸附剂(4:1、6:1、8:1)对刚果红的吸附容量可分别达到了136.6、113.6和105.4 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$.

图4 pH对吸附的影响($t = 2 \text{ h}$)Fig. 4 Influences of pH on the adsorption($t = 2 \text{ h}$)

2.5 动力学模型

为了进一步地研究Poly(AM-co-DVB)对刚果红的吸附动力学过程,采用假一阶和假二阶动力学模型对图5(a)中的数据进行模拟[图5(b)和5(c)].假一

阶和假二阶模型的数学表达式分别如下:

假一阶模型:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - K_1 t \tag{2}$$

假二阶模型:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \tag{3}$$

式中, q_e 和 q_t 分别为吸附平衡与时间 t 时的吸附量 ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$). t 为吸附时间 (min). K_1 (min^{-1}) 和 K_2 [$\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{min})^{-1}$] 分别是假一阶和假二阶动力学模型的速率常数.

表 1 为 Poly(AM-co-DVB) 对刚果红的动力学模型参数的拟合值. 由图 5(b)、5(c) 和表 1 可知假一阶动力学方程的决定系数 R^2 较小, 且计算的理论吸

附量与实际测量相差很大. 而对于假二阶动力学模型而言, 其决定系数 R^2 均大于 0.99, 且理论计算的吸附量与实测值相近. 这说明 Poly(AM-co-DVB) 对刚果红的吸附不仅是物理作用, 还存在着化学作用. 速率控制是吸附环节中非常重要的一部分, 实验以粒子内部扩散模型深入探讨了 Poly(AM-co-DVB) 对刚果红的吸附速率控制过程. 其计算公式如下:

$$q_t = K_3 t^{1/2} + C \tag{4}$$

式中, K_3 为粒子内部扩散速率常数 [$\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{min}^{1/2})^{-1}$], t 为时间 (min), C 为截距 ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$). 作 $q_t-t^{1/2}$ 如图 6, 其计算结果列于表 2.

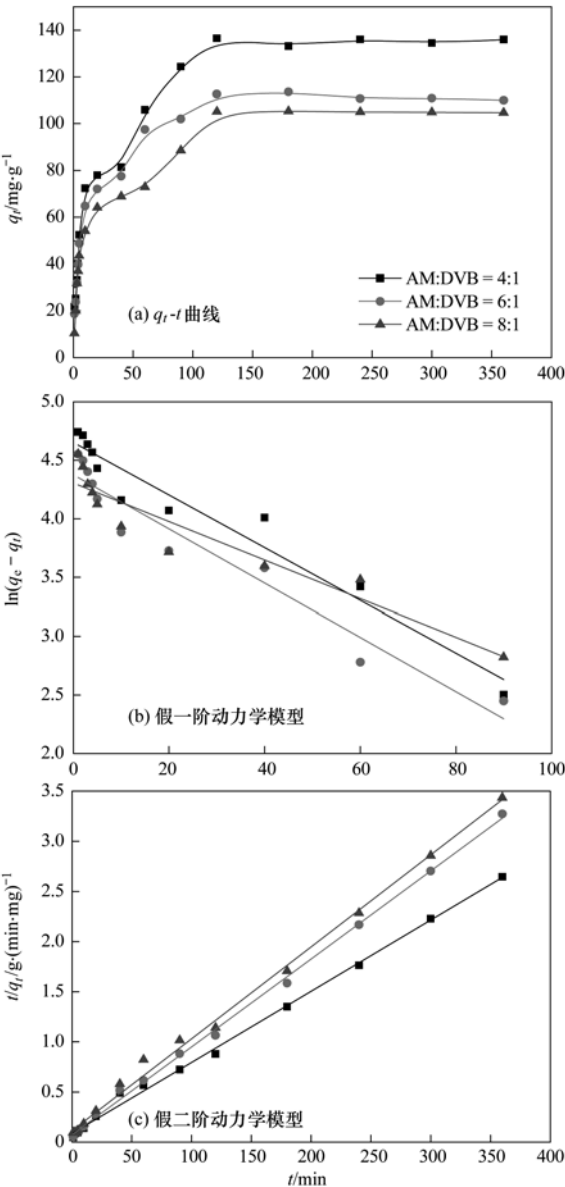


图 5 吸附动力学

Fig. 5 Adsorption kinetics of Poly(AM-co-DVB)

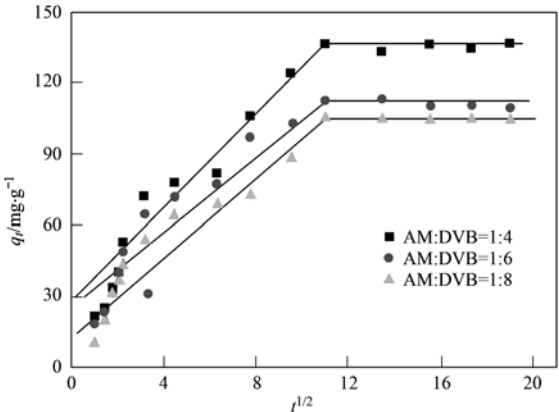


图 6 粒子扩散模型

Fig. 6 Particle diffusion model

实验通过粒子扩散模型探讨吸附过程中的控制过程, 若内部扩散模型拟合曲线过原点说明速率控制过程主要受内部扩散影响. 由图 6 可以看出 AM 在聚合物上的吸附分为两部分, 这表明其吸附过程主要受到表面吸附效应和粒子内部扩散的影响. 初始曲线表明吸附过程中存在界面层效应, 第二条曲线表明存在粒子内或孔扩散效应. 在第二条 $q_t-t^{1/2}$ 曲线中, 3 条线的截距分别是 135.4、117.7、106.0 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 可以明显看出拟合曲线未过原点. 在表 2 中, 第一条 $q_t-t^{1/2}$ 曲线的 R^2 数值均较小, 说明粒子表面吸附效应不是吸附过程中唯一的速率控制步骤, 吸附过程主要是通过粒子内部扩散和表面吸附效应控制的^[15,16].

2.6 吸附等温线

吸附等温线是研究吸附过程的重要因素, 实验采用了 Langmuir, Freundlich 两种著名的等温模型对 Poly(AM-co-DVB) 对刚果红的吸附进行模拟, 其数学表达式如下.

Langmuir 模型:

$$\frac{c_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{c_e}{q_m} \tag{5}$$

Freundlich 模型:

$$\ln q_e = \ln K_F + \left(\frac{1}{n}\right) \ln c_e \tag{6}$$

式中, c_e 为吸附平衡时的浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). q_e 为吸附平衡时的吸附量 ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$). q_m 为 Langmuir 理论最大吸附量 ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$). K_L 、 K_F 分别是两种等温方程的吸附常数.

表 1 两种动力学模型参数

AM: DVB	假一阶动力学方程			假二阶动力学方程			
	K_1/min^{-1}	$q_e/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	R^2	$K_2/\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{min})^{-1}$	$q_e/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	R^2	$q_{\text{real}}/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$
4:1	0.022 5	105.0	0.896 2	0.003 3	140.8	0.997	136.6
6:1	0.023 1	79.7	0.905 3	0.001 1	114.0	0.998	113.6
8:1	0.016 4	78.6	0.993 0	0.001 8	109.0	0.998	105.4

表 2 离子内部扩散模型参数

AM: DVB	$K_3/\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{min}^{1/2})^{-1}$	$C/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	R^2
4:1	11.4	18.4	0.924
6:1	9.61	19.6	0.903
8:1	7.90	17.9	0.859

表 3 Langmuir 等温吸附模型参数

温度/ $^{\circ}\text{C}$	AM: DVB = 4:1			AM: DVB = 6:1			AM: DVB = 8:1		
	$K_L/\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$	$q_m/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	R^2	$K_L/\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$	$q_m/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	R^2	$K_L/\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$	$q_m/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	R^2
25	3.58×10^{-2}	312.5	0.993	4.55×10^{-2}	191.5	0.994	4.55×10^{-2}	166.4	0.999
40	3.43×10^{-2}	326.8	0.990	3.63×10^{-2}	245.7	0.990	7.53×10^{-2}	174.8	0.994
55	3.70×10^{-2}	354.6	0.992	6.50×10^{-2}	265.3	0.993	9.63×10^{-2}	239.2	0.997

表 4 Freundlich 等温吸附模型参数

温度/ $^{\circ}\text{C}$	AM: DVB = 4:1			AM: DVB = 6:1			AM: DVB = 8:1		
	K_F	$1/n$	R^2	K_F	$1/n$	R^2	K_F	$1/n$	R^2
25	46.9	0.339	0.831	54.6	0.219	0.872	64.6	0.159	0.613
40	38.4	0.387	0.772	41.1	0.318	0.847	51.4	0.244	0.732
55	56.9	0.329	0.811	70.0	0.243	0.729	69.0	0.231	0.706

由表 3 和 4 可知: Langmuir 等温方程线性拟合决定系数 (R^2) 远远大于 Freundlich 等温吸附方程, 这说明 Poly (AM-co-DVB) 对刚果红的吸附更符合 Langmuir 等温吸附模型, 表明单分子层的均匀吸附在吸附过程中起到主导作用^[17]. 采用无量纲常数-分离常数 R_L 进一步分析 Langmuir 等温吸附模型. 其数学表达式如下:

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L c_0} \tag{7}$$

式中, c_0 为刚果红溶液的初始浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), K_L 为 Langmuir 等温模型常数. 根据 R_L 的大小可将

图 7 为不同比例的 Poly (AM-co-DVB) 对刚果红吸附的 Langmuir 等温线. 将图 6 中的吸附数据进行线性拟合, 3 种不同比例的 Poly (AM-co-DVB) 对刚果红吸附的等温模型参数列于表 3 中.

图 8 为不同比例的 Poly (AM-co-DVB) 对刚果红吸附的 Freundlich 等温线, 其线性拟合数据列于表 4.

Langmuir 模型分为 4 种吸附类型: $0 < R_L < 1$, 有利于吸附进行, $R_L > 1$, 吸附不能进行, $R_L = 1$, 吸附呈线性关系, $R_L = 0$, 不可逆吸附^[18]. 根据实验数据其计算结构列于表 5. 从中的计算结果可以发现 R_L 的数值均小于 1, 说明 Poly (AM-co-DVB) 对刚果红的吸附是易于进行的.

总之, 3 种不同比例的吸附剂对刚果红都有很好的吸附性能, 但随着 AM 比例的不断增大, Poly (AM-co-DVB) 对刚果红的吸附存在下降趋势, 这与预期的结果不同, 这可能是由于随 AM 比例的不断增大, 聚合物趋向于形成聚丙烯酰胺 (PAM),

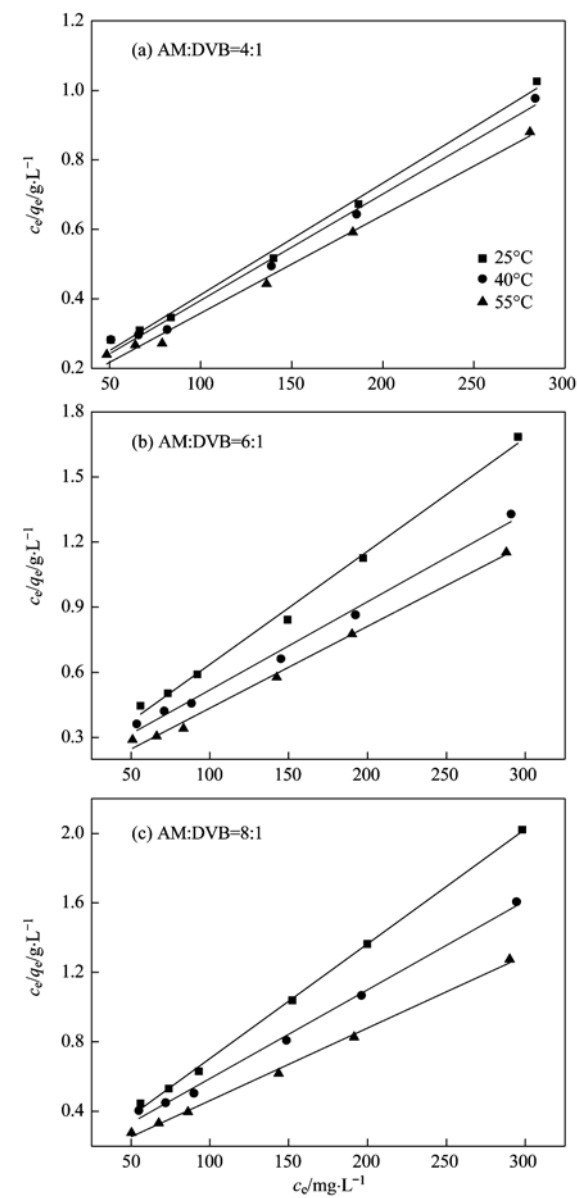


图 7 Langmuir 等温吸附模型
Fig. 7 Langmuir adsorption isotherm

表 5 R_L 计算值

Table 5 Calculated values of R_L

温度/℃	AM: DVB = 4: 1	AM: DVB = 6: 1	AM: DVB = 8: 1
25	0.289	0.242	0.242
40	0.299	0.286	0.166
55	0.282	0.183	0.131

DVB 组分的降低,而 PAM 对刚果红没有明显的吸附效果.

表 6 为 Poly(AM-co-DVB) 和已报道过的吸附剂对溶液中刚果红的单位吸附量. 从中可以看出 Poly(AM-DVB) 对刚果红有很好的吸附性能, 可以作为一种有效的吸附剂.

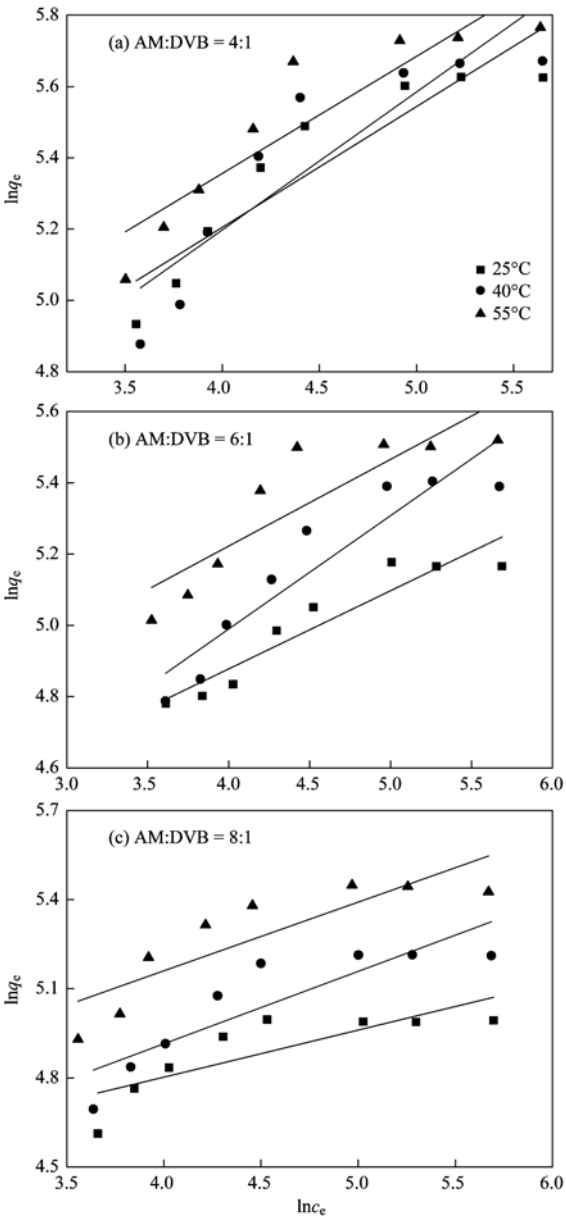


图 8 Freundlich 等温吸附模型
Fig. 8 Freundlich adsorption isotherm

表 6 不同材料对刚果红吸附性能的比较

Table 6 CR adsorption capacities of different adsorbents

吸附剂	吸附量 $q/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	文献
羟基磷灰石	190.0	[1]
四氧化三铁-沸石	146.0	[19]
多级介孔碳	446.9	[20]
Poly(AM-co-DVB)	319.1	本研究

2.7 吸附热力学

探讨温度的影响能够为吸附过程中能量的改变和吸附机制提供有效信息. 吉布斯自由能变 (ΔG^θ)、焓变 (ΔH^θ)、熵变 (ΔS^θ) 用来描述整个吸附过程中的热力学变化. 其数学表达式如下:

$$\Delta G^\ominus = -RT\ln K \tag{8}$$

$$\ln K = -\frac{\Delta H^\ominus}{RT} + \frac{\Delta S^\ominus}{R} \tag{9}$$

$$K = \frac{q_e}{c_e} \tag{10}$$

$$\Delta G^\ominus = \Delta H^\ominus - T\Delta S^\ominus \tag{11}$$

式中, T 为绝对温度(K). c_e 为吸附平衡时刚果红溶液浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). q_e 为刚果红吸附平衡时吸附量 ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$). R 为热力学常数 ($8.314\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$), K 为常

数($\text{L}\cdot\text{g}$). 热力学参数最终计算结果列于表 7. 从中可知:3 种不同比例的 Poly(AM-co-DVB)随着丙烯酸酰胺比例的不断增大,吸附过程均为自发过程,且对同一比例吸附剂随着温度升高 $\Delta G^\ominus$ 逐渐降低,说明随温度升高,吸附过程更趋向于自发进行. $\Delta H^\ominus$ 的数值均大于 0 说明 Poly(AM-co-DVB)对刚果红的吸附过程是一个吸热过程,这与实验中随着温度的升高,吸附量呈上升的趋势相一致. $\Delta S^\ominus$ 的数值全部大于 0,说明吸附过程中的混乱度在增加,更有利于吸附的进行^[21].

表 7 热力学参数

Table 7 Thermodynamic parameters of the adsorption

AM: DVB	T/K	$\Delta G^\ominus/\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$	$\Delta H^\ominus/\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$	$\Delta S^\ominus/\text{J}\cdot(\text{mol}\cdot\text{K})^{-1}$
4:1	298	-2.89	3.9	22.9
	313	-3.21		
	328	-3.58		
6:1	298	-1.66	13.3	50.2
	313	-2.41		
	328	-3.16		
8:1	298	-1.51	12.6	47.2
	313	-2.22		
	328	-2.93		

3 结论

(1) Poly(AM-co-DVB)对刚果红具有优异的吸附性能,在考察的温度范围内其最大吸附量达到了 $319.1\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$.

(2) Poly(AM-co-DVB)对刚果红的吸附符合 Langmuir 等温吸附方程和假二阶动力学方程,粒子内部扩散模型证实其对刚果红的吸附过程主要受到粒子内部扩散和表面吸附效应的控制.

(3) 计算热力学数据说明吸附过程是一个自发吸热过程.

(4) 所有实验结果证实 Poly(AM-co-DVB)对刚果红具有优越吸附性能,这对以后交联聚合物在吸附领域的研究具有重要的意义.

致谢:感谢实验室全组人员的帮助.

参考文献:

[1] 詹艳慧, 林建伟. 羟基磷灰石对水中刚果红的吸附作用研究[J]. 环境科学, 2013, 34(8): 3144-3150.

[2] Li X G, Ma X L, Sun J, et al. Powerful reactive sorption of silver(I) and mercury(II) onto poly(o-phenylenediamine) microparticles[J]. Langmuir, 2009, 25(3): 1675-1684.

[3] Cai J G, Li A M, Shi H Y, et al. Adsorption characteristics of aniline and 4-methylaniline onto bifunctional polymeric adsorbent modified by sulfonic groups[J]. Journal of Hazardous Materials, 2005, 124(1-3): 173-180.

[4] Pandit P, Basu S. Removal of ionic dyes from water by solvent

extraction using reverse micelles[J]. Environmental Science Technology, 2004, 38(8): 2435-2442.

[5] Marechal A M L, Slokar Y M, Taufer T. Decoloration of chlorotriazine reactive azo dyes with $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ [J]. Dyes and Pigments, 1997, 33(4): 281-298.

[6] Li T, Guthrie J T. Colour removal from aqueous solutions of metal-complex azo dyes using bacterial cells of *Shewanella* strain J18 143[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(12): 4291-4295.

[7] Daas A, Hamdaoui O. Extraction of anionic dye from aqueous solutions by emulsion liquid membrane[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 178(1-3): 973-981.

[8] Fernandez J, Kiwi J, Lizama C, et al. Factorial experimental design of orange II photocatalytic discoloration[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 2002, 151(1-3): 213-219.

[9] 郝艳玲, 王远, 董良宇, 等. 坡缕石粘土对有机染料的吸附热力学研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2009, 28(6): 661-664.

[10] 沙宇, 刘乃瑞, 田小丽, 等. 焙烧态镁铝水滑石对刚果红的脱色性能研究[J]. 工业用水与废水, 2009, 40(6): 78-81.

[11] Mahmoodi N M, Sadeghi U, Maleki A, et al. Synthesis of cationic polymeric adsorbent and dye removal isotherm, kinetic and thermodynamic[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2014, 20(5): 2745-2753.

[12] Xue T S, Gao Y S, Umar A, et al. Adsorption of acid red from dye wastewater by $\text{Zn}_2\text{Al-NO}_3$ LDHs and the resource of adsorbent sludge as nanofiller for polypropylene[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 587: 99-104.

[13] He X Y, Male K B, Nesterenko P N, et al. Adsorption and

- desorption of methylene blue on porous carbon monoliths and nanocrystalline cellulose [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2013, **5**(17): 8796-8804.
- [14] Kousha M, Daneshvar E, Sohrabi M S, *et al.* Adsorption of acid orange II dye by raw and chemically modified brown macroalga *Stoechospermum marginatum*[J]. Chemical Engineering Journal, 2012, **192**(2): 67-76.
- [15] 马杰, 虞琳琳, 金路, 等. 改性碳纳米管原始样品吸附亚甲基蓝的性能研究[J]. 环境化学, 2012, **31**(5): 646-652.
- [16] Feng X, You W, Zhan H B. Mildly alkaline preparation and methylene blue adsorption capacity of hierarchical flower-like sodium titanate [J]. ACS Apply Materials & Interfaces, 2013, **5**(23): 12654-12662.
- [17] Long R Q, Yang R T. Carbon nanotubes as superior sorbent for dioxin removal [J]. Journal of the American Chemical Society, 2001, **123**(9): 2053-2057.
- [18] Sari A, Tuzen M, Gitak T, *et al.* Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies of adsorption Pb (II) from aqueous solution onto Turkish kaolinite clay [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, **149**(2): 283-291.
- [19] 林建伟, 王昕睿, 詹艳慧, 等. 阳离子表面活性剂改性四氧化三铁-沸石复合材料对水中刚果红的去除作用[J]. 环境工程学报, 2014, **8-12**(2): 2725-2732.
- [20] 王科, 韩淑怡, 商红岩, 等. 多级介孔碳对刚果红染料吸附性能的研究[J]. 炭素, 2012, **2**(150): 8-12.
- [21] Zhou J B, Cheng Y, Yu J G, *et al.* Hierarchically porous calcined lithium/aluminum layered double hydroxides: Facile synthesis and enhanced adsorption towards fluoride in water [J]. Journal of Materials Chemistry, 2011, **21** (48): 19353-19361.

CONTENTS

Hygroscopic Properties of Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing in Spring	XU Bin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Relative Humidity and Aerosol Physicochemical Properties on Atmospheric Visibility in Northern Suburb of Nanjing	YU Xing-na, MA Jia, ZHU Bin, <i>et al.</i> (1919)
Pollution Characteristics and Light Extinction Effects of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter Hazy Days at North Suburban Nanjing ...	ZHOU Yao-yao, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1926)
Characteristics of Winter Atmospheric Mixing Layer Height in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Their Relationship with the Atmospheric Pollution	LI Meng, TANG Gui-qian, HUANG Jun, <i>et al.</i> (1935)
Process-based Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Paint Industry in the Yangtze River Delta, China	MO Zi-wei, NIU He, LU Si-hua, <i>et al.</i> (1944)
Concentrations and Speciation of Dissolved Heavy Metal in Rainwater in Guiyang, China	ZHU Zhao-zhou, LI Jun, WANG Zhi-ru (1952)
Situation and Characteristics of Air Pollutants Emission from Crematories in Beijing, China	XUE Yi-feng, YAN Jing, TIAN He-zhong, <i>et al.</i> (1959)
Emission Characteristics of Water-Soluble Ions in Fumes of Coal Fired Boilers in Beijing	HU Yue-qi, MA Zhao-hui, FENG Ya-jun, <i>et al.</i> (1966)
Analysis on Mechanism of Rainout Carried by Wet Stack of Thermal Power Plant	OUYANG Li-hua, ZHUANG Ye, LIU Ke-wei, <i>et al.</i> (1975)
Removal Characteristics of Elemental Mercury by Mn-Ce/molecular Sieve	TAN Zeng-qiang, NIU Guo-ping, CHEN Xiao-wen, <i>et al.</i> (1983)
Indoor Exposure to Particle-Bound BFRs via Inhalation	LI Xiu-wen, ZENG Hui, NI Hong-gang (1989)
Organic Carbon and Elemental Carbon in Forest Biomass Burning Smoke	HUANG Ke, LIU Gang, ZHOU Li-min, <i>et al.</i> (1998)
Atmospheric Particle Retaining Function of Common Deciduous Tree Species Leaves in Beijing	WANG Bing, WANG Xiao-yan, NIU Xiang, <i>et al.</i> (2005)
Photonic Efficiency of Ethyl Acetate Photolysis in Gas Phase: Dependence on Wavelength and Catalyst	FANG Xue-hui, ZHAO Jie, SHU Li, <i>et al.</i> (2010)
Phytoplankton Light Absorption Properties During the Blooms in Adjacent Waters of the Changjiang Estuary	LIU Yang-yang, SHEN Fang, LI Xiu-zhen (2019)
Pollution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Offshore Marine Area of Shenzhen	LIU Bao-lin, ZHANG Hong, XIE Liu-wei, <i>et al.</i> (2028)
Composition and Environmental Effects of LFOM and HFOM in "Incense-Ash" Sediments of West Lake, Hangzhou, China	LI Jing, ZHU Guang-wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (2038)
Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments from the Heavily Polluted Area of Xiaoqing River	HUANG Ying, LI Yong-xia, GAO Fu-wei, <i>et al.</i> (2046)
Response of Algae to Nitrogen and Phosphorus Concentration and Quantity of Pumping Water in Pumped Storage Reservoir	WAN You-peng, YIN Kui-hao, PENG Sheng-hua (2054)
Temporal and Spatial Variation of Nutrients and Chlorophyll a, and Their Relationship in Pengxi River Backwater Area, Three Gorges Reservoir	ZHANG Lei, WEI Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2061)
Environmental Effects of Algae Bloom Cluster: Impact on the Floating Plant Water Hyacinth Photosynthesis	BAO Xian-ming, GU Dong-xiang, WU Ting-ting, <i>et al.</i> (2070)
<i>In Situ</i> High-Resolution Analysis of Labile Phosphorus in Sediments of Lake Chaohu	LI Chao, WANG Dan, YANG Jin-yan, <i>et al.</i> (2077)
Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon Stable Isotope of Shibing Dolomite Karst Area in Guizhou Province	XIAO Shi-zhen, LAN Jia-cheng, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2085)
Stable Isotope Characteristics in Different Water Bodies in Changsha and Implications for the Water Cycle	LI Guang, ZHANG Xin-ping, ZHANG Li-feng, <i>et al.</i> (2094)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes of Soil Water in the Water Source Area of Yuanyang Terrace	ZHANG Xiao-juan, SONG Wei-feng, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2102)
Performance of Grass Swales for Controlling Pollution of Roadway Runoff in Field Experiments	HUANG Jun-jie, SHEN Qing-ran, LI Tian (2109)
Performance Study of Bromochloroacetonitrile Degradation in Drinking Water by Fe/Cu Catalytic Reduction	DING Chun-sheng, MA Hai-long, FU Yang-ping, <i>et al.</i> (2116)
Catalytic Degradation of Diclofenac Sodium over the Catalyst of 3D Flower-like α -FeOOH Synergized with H ₂ O ₂ Under Visible Light Irradiation	XU Jun-ge, LI Yun-qin, HUANG Hua-shan, <i>et al.</i> (2122)
Degradation of Organic Sunscreens 2-hydroxy-4-methoxybenzophenone by UV/H ₂ O ₂ Process: Kinetics and Factors	FENG Xin-xin, DU Er-deng, GUO Ying-qing, <i>et al.</i> (2129)
Photocatalytic Degradation of Perfluorooctanoic Acid by Pd-TiO ₂ Photocatalyst	LIU Qing, YU Ze-bin, ZHANG Rui-han, <i>et al.</i> (2138)
Efficient Photolysis of Acid Orange 7 Using Low-frequency Electrodeless Lamp	WU Peng, WU Jun, GAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (2147)
Degradation of 3,4-Dichlorobenzotrifluoride by Fe ₃ O ₄ /CeO ₂ -H ₂ O ₂ Heterogeneous Fenton-Like Systems	SUN Zheng-nan, YANG Qi, JI Dong-li, <i>et al.</i> (2154)
Preparation of Coated CMC-Fe ⁰ Using Rheological Phase Reaction Method and Research on Degradation of TCE in Water	FAN Wen-jing, CHENG Yue, YU Shu-zhen, <i>et al.</i> (2161)
Degradation Mechanism of 4-Chlorophenol on a Pd-Fe/graphene Multifunctional Catalytic Cathode	QI Wen-zhi, WANG Fan, WANG Hui, <i>et al.</i> (2168)
Removal Kinetics and Mechanism of Aniline by Manganese-oxide-modified Diatomite	XIAO Shao-dan, LIU Lu, JIANG Li-ying, <i>et al.</i> (2175)
Adsorption Characteristics of Nitrate and Phosphate from Aqueous Solution on Zirconium-Hexadecyltrimethylammonium Chloride Modified Activated Carbon	ZHENG Wen-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2185)
Removal Congo Red from Aqueous Solution Using Poly (AM-co-DVB)	ZHANG Luan-luan, LIAO Yun-wen, GAO He-jun, <i>et al.</i> (2195)
Energy Consumption Comparison and Energy Saving Approaches for Different Wastewater Treatment Processes in a Large-scale Reclaimed Water Plant	YANG Min, LI Ya-ming, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (2203)
Transformation Regularity of Nitrogen in Aqueous Product Derived from Hydrothermal Liquefaction of Sewage Sludge in Subcritical Water	SUN Yan-qing, SUN Zhen, ZHANG Jing-lai (2210)
Start-up Performance of ANAMMOX Enrichment with Different Inoculated Sludge in Anaerobic Baffled Reactor	ZHANG Hai-qin, WANG Fan-fan, LI Yue-han, <i>et al.</i> (2216)
Influencing Factors for Hydrolysis of Sewage Sludge Pretreated by Microwave-H ₂ O ₂ -OH Process	JIA Rui-lai, WEI Yuan-song, LIU Ji-bao (2222)
Enrichment and Characterization of a Denitrifying Bacteria Consortium from Lihe River's Sediment	YONG Jia-jun, CHENG Xiao-ying (2232)
Investigation for Filamentous Bacteria Community Diversity in Activated Sludge Under Various Kinds and Concentration Conditions of Antibiotics	WANG Run-fang, WANG Qin, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (2239)
Isolation and Identification of Petroleum Degradation Bacteria and Interspecific Interactions Among Four <i>Bacillus</i> Strains	WANG Jia-nan, SHI Yan-yun, ZHENG Li-yan, <i>et al.</i> (2245)
Effects of Dissimilatory Reduction of Goethite on Mercury Methylation by <i>Shewanella oneidensis</i> MR-1	SI You-bin, SUN Lin, WANG Hui (2252)
Effect of Root Iron Plaque on Norfloxacin Uptake by Rice	MA Wei, BAO Yan-yu (2259)
Effects of Tillage on Soil Respiration and Root Respiration Under Rain-Fed Summer Corn Field	LU Xing-li, LIAO Yun-cheng (2266)
Seasonal Provincial Characteristics of Vertical Distribution of Dust Loadings and Heavy Metals near Surface in City	LI Xiao-yan, ZHANG Shu-ting (2274)
Characteristics of Phthalic Acid Esters in Agricultural Soils and Products in Areas of Zhongshan City, South China	LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (2283)
Variations and Influencing Factors of Oral Bioaccessibility of Polybrominated Diphenyl Ethers in Soils Using an <i>In-vitro</i> Gastrointestinal Model	ZHANG Yun-hui, LIU Wei-jian, CHENG Fang-fang, <i>et al.</i> (2292)
Impacts of Biochar Input on Mineralization of Native Soil Organic Carbon	CHEN Wei, HU Xue-yu, LU Hai-nan (2300)
Effects of Remedies on the Remediation of Typical Pb and Zn-contaminated soil in Huanjiang, Guangxi	ZENG Wei-quan, SONG Bo, YUAN Li-zhu, <i>et al.</i> (2306)
Mechanism Study of the Smectite-OR-SH Compound for Reducing Cadmium Uptake by Plants in Contaminated Soils	ZENG Yan-jun, ZHOU Zhi-jun, ZHAO Qiu-xiang (2314)
Land Use Pattern Change and Regional Sustainability Evaluation of Wetland in Jiaogang Lake	YANG Yang, CAI Yi-min, BAI Yan-ying, <i>et al.</i> (2320)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年6月15日 第36卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 6 Jun. 15, 2015

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: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行