

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第9期

Vol.34 No.9

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

利用PUF被动采样技术研究长三角城市群大气中多环芳烃的时空分布及来源	张利飞, 杨文龙, 董亮, 史双昕, 周丽, 张秀蓝, 李玲玲, 钮珊, 黄业茹 (3339)
FTIR对大气颗粒物PM _{2.5} 中硝酸盐的定量分析	刘娜, 魏秀丽, 高闯光, 徐亮, 焦洋, 李胜, 童晶晶, 程已阳 (3347)
福建茫荡山地区春季大气O ₃ 、HONO、HCHO、H ₂ O ₂ 对·OH的贡献率研究	刘昊, 王会祥 (3352)
水体类固醇雌激素污染现状研究进展	都韶婷, 金崇伟, 刘越 (3358)
嘉兴市地表水中兽用抗生素的污染现状调查	闫幸, 余卫娟, 兰亚琼, 李立, 吕升, 叶朝霞, 张永明, 刘锐, 陈吕军 (3368)
上海食用鱼中短链氯化石蜡的污染特征	姜国, 陈来国, 何秋生, 孟祥周, 封永斌, 黄玉妹, 唐才明 (3374)
水体环境内毒素活性的鲎法定量检测及影响因素研究	张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 孙雯, 钱令嘉, 战锐 (3381)
四环素类抗生素对淡水绿藻的毒性作用	徐冬梅, 王艳花, 饶桂维 (3386)
光照对东海典型赤潮藻生长及硝酸还原酶活性的影响	李鸿妹, 石晓勇, 丁雁雁, 唐洪杰 (3391)
围隔实验中浒苔在不同营养盐条件下的生长比较	庞秋婷, 李凤, 刘湘庆, 王江涛 (3398)
长江口及邻近海域浮游植物色素分布与群落结构特征	赖俊翔, 俞志明, 宋秀贤, 韩笑天, 曹西华, 袁涌铨 (3405)
长江中下游湖泊超微型真核藻类遗传多样性研究	李胜男, 史小丽, 谢微微, 龚伊, 孔繁翔 (3416)
峡谷型水源水库的氮、磷季节变化及其来源分析	黄廷林, 秦昌海, 李璇 (3423)
九龙江河流-库区系统沉积物磷特征及其生态学意义	鲁婷, 陈能汪, 陈朱虹, 王龙剑, 吴杰忠 (3430)
氮在高含沙水向人工浅水湖泊补水期间的变化规律	陈友媛, 申宇, 杨世迎 (3437)
石灰石和黄铁矿-石灰石人工湿地净化河水的研究	张菁, 李睿华, 李杰, 胡俊松, 孙茜茜 (3445)
杭州湾潮滩湿地3种优势植物碳氮磷储量特征研究	邵学新, 李文华, 吴明, 杨文英, 蒋科毅, 叶小齐 (3451)
滇池优势挺水植物茭草和芦苇降解过程中DOM释放特征研究	谢理, 杨浩, 渠晓霞, 朱元荣, 鄢元波, 张明礼, 吴丰昌 (3458)
自来水处理工艺对溶解相中全氟化合物残留的影响	张鸿, 陈清武, 王鑫璇, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 刘国卿 (3467)
J市饮用水氯消毒副产物分析及其健康风险评价	李晓玲, 刘锐, 兰亚琼, 余素林, 文晓刚, 陈吕军, 张永明 (3474)
水中硫酸根及溶解氧质量浓度变化对管垢金属元素释放的影响	吴永丽, 石宝友, 孙慧芳, 张枝焕, 顾军农, 王东升 (3480)
重金属捕集剂对水中微量Hg(II)的处理研究	胡运俊, 盛田田, 薛晓芹, 谭丽莎, 徐新华 (3486)
聚合氯化铁-聚(环氧氯丙烷-二甲胺)复合絮凝剂在模拟水处理中的混凝特性研究	刘新新, 杨忠莲, 高宝玉, 王燕, 岳钦艳, 李倩 (3493)
镁铝复合脱色絮凝剂的微观结构形态及絮凝机制	桑义敏, 常雪红, 车越, 谷庆宝 (3502)
钴掺杂铁酸铋活化过硫酸盐降解水中四溴双酚A的研究	欧阳磊, 丁耀彬, 朱丽华, 唐和清, 廖海星 (3507)
以海泡石为载体的双金属多相类芬顿催化剂的制备及表征	宿程远, 李伟光, 刘兴哲, 王恺尧, 王勇 (3513)
氧化还原介体调控亚硝酸盐反硝化特性研究	赵丽君, 马志远, 郭延凯, 席振华, 杜海峰, 刘晓宇, 郭建博 (3520)
缓释碳源滤料滤池用于二级出水的深度脱氮	唐蕾, 李彭, 左剑恶, 袁琳, 李再兴 (3526)
微膨胀对好氧颗粒污泥脱氮过程中N ₂ O产生量的研究	陈丽丽, 高大文 (3532)
Fenton试剂与CPAM联合调理对污泥脱水效果的影响研究	马俊伟, 刘杰伟, 曹芮, 岳东北, 王洪涛 (3538)
高效厌氧氨氧化颗粒污泥的动力学特性	唐崇俭, 熊蕾, 王云燕, 郑平 (3544)
内蒙古温带草原氮沉降的观测研究	张菊, 康荣华, 赵斌, 黄永梅, 叶芝祥, 段雷 (3552)
湘中矿区不同用地类型面源Cd输出负荷的原位实验研究	刘孝利, 曾昭霞, 陈喆, 铁柏清, 陈求稳, 叶长城 (3557)
蠡湖沉积物重金属形态及稳定性研究	王书航, 王雯雯, 姜霞, 宋倩文 (3562)
密云县境内潮河流域土壤重金属分析评价	于洋, 高宏超, 马俊花, 李迎霞, 莫雁, 孔彦鸿 (3572)
西北干旱区黄河沿岸典型工业带表土磁性特征及其环境意义	许淑婧, 张英, 余晔, 王博, 夏敦胜 (3578)
复合稳定剂对砷污染土壤的稳定研究	王浩, 潘利祥, 张翔宇, 李萌, 宋宝华 (3587)
湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征	何东, 邱波, 彭尽晖, 彭亮, 胡凌雪, 胡瑶 (3595)
安太堡露天矿复垦地不同人工植被恢复下的土壤酶活性和肥力比较	王翔, 李晋川, 岳建英, 周小梅, 郭春燕, 卢宁, 王宇宏, 杨生权 (3601)
三苯基锡的微生物降解及其对降解菌的影响	叶锦韶, 田云, 尹华, 彭辉, 黄捷, 麻榆佳 (3607)
二氯甲烷降解菌Methylobacterium rhodesianum H13的分离鉴定及降解特性研究	刘洪霞, 朱润晔, 欧阳杜娟, 庄庆丰, 陈东之, 陈建孟 (3613)
引物选择对污泥微生物多样性分析的影响	徐爱玲, 吴等等, 宋志文, 任杰, 夏岩, 董珊珊, 刘梦 (3620)
钙铝类水滑石衍生复合氧化物的SO ₂ 储存性能研究	曹琳, 王海林, 解强 (3627)
基于转运站满负荷的北京市新东西城区生活垃圾物流优化方案研究	袁京, 李国学, 张红玉, 罗一鸣 (3633)
重金属污染土壤治理与生态修复论坛会议论文	
多证据分析技术在地表重金属污染评价中的应用研究	姜林, 钟茂生, 朱笑盈, 姚珏君, 夏天翔, 刘辉 (3641)
我国城市不同功能区地表灰尘重金属分布及来源	李晓燕, 刘艳青 (3648)
黄河下游滩区开封段土壤重金属分布特征及其潜在风险评价	张鹏岩, 秦明周, 闫江虹, 胡长慧, 赵亚平 (3654)
青岛北站规划区原场地表层土壤重金属污染研究	朱磊, 贾永刚, 潘玉英 (3663)
某铅蓄电池厂土壤中铅的含量分布特征及生态风险	郑立保, 陈卫平, 焦文涛, 黄锦楼, 魏福祥 (3669)
某铅冶炼厂对周边土壤质量和人体健康的影响	周小勇, 雷梅, 杨军, 周广东, 郭广慧, 陈同斌, 万小铭, 梁琪, 乔鹏伟 (3675)
某铅蓄电池厂表土不同粒径中铅分布规律研究	岳希, 孙体昌, 黄锦楼 (3679)
原位生物稳定固化技术在铬污染场地治理中的应用研究	张建荣, 李娟, 许伟 (3684)
淋洗剂对多金属污染尾矿土壤的修复效应及技术研究	朱光旭, 郭庆军, 杨俊兴, 张晗芝, 魏荣菲, 王春雨, Marc Peters (3690)
铅蓄电池厂污染土壤中重金属铅的清洗及形态变化分析	任贝, 黄锦楼, 苗明升 (3697)
超声波辅助化学萃取对某工业场地铅污染土壤修复效果研究	王鑫杰, 黄锦楼, 刘志强, 岳希 (3704)
摩擦清洗修复铅污染土壤的参数优化及清洗效率评价	杨雯, 黄锦楼, 彭会清, 李思拓 (3709)
土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉的吸附特性研究	郭文娟, 梁学峰, 林大松, 徐应明, 王林, 孙约兵, 秦旭 (3716)
无机稳定剂对重金属污染土壤的化学稳定修复研究	曹梦华, 祝玺, 刘黄诚, 王琳玲, 陈静 (3722)
《环境科学》征稿简则(3404) 《环境科学》征订启事(3444) 信息(3492, 3551, 3696, 3715)	

聚合氯化铁-聚(环氧氯丙烷-二甲胺)复合絮凝剂在模拟水处理中的混凝特性研究

刘新新, 杨忠莲, 高宝玉*, 王燕, 岳钦艳, 李倩

(山东大学环境科学与工程学院, 山东省水污染控制与资源化重点实验室, 济南 250100)

摘要: 制备出一系列具有不同聚合氯化铁(PFC)的碱化度(B)、不同聚(环氧氯丙烷-二甲胺)[P(EPI-DMA)]质量分数 $[\omega(E)]$ 和黏度(η)的PFC-P(EPI-DMA)复合混凝剂, 并将其用于模拟染料废水和模拟天然地表水的絮凝脱色处理, 对比探讨了 $\omega(E)$ 、 η 和 B 对PFC-P(EPI-DMA)中铁的形态分布及其混凝效果的影响, 以及混凝作用机制。结果表明, 复合絮凝剂中铁的有效形态含量随 $\omega(E)$ 的增大而不断降低; $\eta = 850 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 时, 复合混凝剂中铁的有效形态含量最高; 随 B 值的增大, Fe_b 含量先增大后减少, 而 Fe_c 含量逐渐增大。一定程度上使用预水解程度较低、有机成分黏度较大的PFC-P(EPI-DMA)有利于混凝效果的提高, 复合混凝剂中有机成分质量分数对混凝效果的影响则与处理对象有关。在模拟水处理中, 复合混凝剂依靠电性中和及架桥吸附能力发挥混凝特性。

关键词: 复合絮凝剂; 混凝效果; 模拟水; 有机组分质量分数; 黏度; 碱化度

中图分类号: X703.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)09-3493-09

Coagulation Characteristics of Polyferric Chloride-Poly (Epichlorohydrin-Dimethylamine) Composite Flocculant for Simulated Water Treatment

LIU Xin-xin, YANG Zhong-lian, GAO Bao-yu, WANG Yan, YUE Qin-yan, LI Qian

(Shandong Key Laboratory of Water Pollution Control and Resource Reuse, School of Environmental Science and Engineering, Shandong University, Ji'nan 250100, China)

Abstract: Polyferric chloride (PFC) and poly(epichlorohydrin-dimethylamine) [P(EPI-DMA)] were applied as raw materials to prepare a novel inorganic-organic flocculant [PFC-P(EPI-DMA)] with various intrinsic viscosities (η), basicity (B , OH/Fe molar ratio), and organic component fractions $[\omega(E)]$. The PFC-P(EPI-DMA) prepared was then evaluated for the coagulation treatment of synthetic active dyeing wastewater and simulated ground water. Effects of B , η and $\omega(E)$ on the Fe speciation distribution and coagulation performance of PFC-P(EPI-DMA) were comparatively examined as a function of coagulant dosage. The coagulation mechanism of PFC-P(EPI-DMA) was also discussed in this paper. Experimental results indicated the interaction effect of PFC and P(EPI-DMA) component in composite PFC-P(EPI-DMA). The effective Fe speciation content of PFC-EPI-DMA decreased with increasing $\omega(E)$, while it was maximized when $\eta = 850 \text{ mPa}\cdot\text{s}$. As B value increased gradually, the Fe_b concentration initially increased and then decreased, but the Fe_c concentration kept continuously increasing. To some extent, higher η and lower B value was favorable for the improvement of coagulation performance for coagulation treatment of both synthetic dyeing wastewater and simulated ground water. The $\omega(E)$ influence on the coagulation performance of PFC-P(EPI-DMA) was related to the treatment target. Both charge neutralization and adsorption bridging effect played roles in the coagulation process of the composite PFC-P(EPI-DMA).

Key words: composite flocculant; coagulation performance; simulated water; organic component mass fraction; viscosity; basicity

化学絮凝法具有工艺简单、操作方便、适用范围广、建设费用低、难生物降解物质处理效果好等优点, 成为水处理领域中一个十分重要的方法^[1, 2]。决定化学絮凝法处理效果的关键因素是絮凝剂种类的选择^[3]。目前普遍使用的铝盐混凝剂存在残余铝毒性、低温除浊能力低等问题^[3, 4], 聚合铁盐絮凝剂以其产生的矾花大、絮体密实、沉降快、污泥脱水性能好、适用 pH 范围广、无毒且价格便宜等优点成为近年来水处理剂研究的热点^[5, 6]。若单独使用无机铁盐类絮凝剂处理废水, 用量大, 污泥产量大, 沉降速度慢, 对水溶性污染物处理效果较

差^[2, 7]。为提高单一聚合铁盐聚合度、稳定性及水处理效果等, 使用有机高分子絮凝剂对聚合铁盐进行复合改性成为新近研究的热点^[8]。无机-有机复合混凝剂包括无机和有机混凝剂两种成分, 其性能受到各种组分性质的影响。有机高分子絮凝剂与无机絮凝剂相比具有絮凝速度快, 用量少, 受共存盐类、pH 及水温影响小等优点^[7, 9], 将其与无机聚合

收稿日期: 2012-12-12; 修订日期: 2013-03-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(21077066); 山东省自然科学基金项目(ZR2010BM014)

作者简介: 刘新新(1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制与资源化, E-mail: 524301925@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: baoyugao_sdu@yahoo.com.cn

铁盐类絮凝剂复合使用能够克服单独使用无机聚合铁盐类絮凝剂或有机絮凝剂时产生的缺点,达到良好的水处理效果. 水溶性有机高分子聚合物聚环氧丙烷-二甲胺 [poly (epichlorohydrin-dimethylamine), P(EPI-DMA)] 是一种阳离子季铵盐,具有正电荷密度高、溶解速度快、高效无毒、分子量易于控制等优点,在采矿、石油方面的应用研究较多,近年来作为一种絮凝剂日益受到关注^[10].

絮凝剂的形态分布是决定絮凝剂絮凝效果的关键因素^[11],混凝过程中混凝剂形成的水解聚合形态,对带负电荷的胶体颗粒表面的吸附-电中和脱稳作用是导致水体胶体颗粒相互聚集成粗大的絮体颗粒而迅速沉降的重要先决条件^[12]. 铁系无机高分子混凝剂是铁盐水解聚合过程的中间产物与阴离子或其它基团的结合体. 研究证明 PFC 是由不同的 Fe(Ⅲ) 水解物质组成^[13],其 Fe(Ⅲ) 水解形态受多种因素的影响. 故同时研究有机高分子聚合物对铁形态分布的影响情况对研制开发高效能的复合聚合铁盐类絮凝剂具有十分重要的指导意义,研究成果对于聚合铁无机-有机复合絮凝剂的开发及扩大其在水处理领域中的应用具有十分重要的理论和实用意义.

目前,对于有机高分子聚合物 P(EPI-DMA) 的合成过程及脱色性能已经有较多的研究^[14,15],文献 [9,16~18] 对 P(EPI-DMA) 和聚合氯化铝复合/复配后的特性及在印染废水中絮凝行为的研究也进行了较多的报道,陈婷等^[10]研究了 P(EPI-DMA) 与聚合氯化铁复配絮凝剂在模拟染料废水中的脱色效果及絮凝机制,而 P(EPI-DMA) 与聚合氯化铁复合混凝剂的特性及絮凝行为的研究尚未见报道. 同时,水源水中有机物对饮用水安全的影响近年来日益成为大家关注的焦点,提高地表水源水中有机物的去除效果具有非常重要的意义. 美国环保局已证明 P(EPI-DMA) 可用于饮用水源水的处理,规定其用量上限为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[19]. 因此,本研究首先以聚合氯化铁 (polyferric chloride, PFC) 和有机高分子聚合物 [P(EPI-DMA)] 为原料,利用复合工艺制备出聚合氯化铁-聚(环氧氯丙烷-二甲胺)复合絮凝剂 [PFC-P(EPI-DMA)],并采用 Fe-Ferron 逐时络合比色法分析了复合絮凝剂中铁的形态分布及其影响因素,为进一步探讨其混凝作用机制提供理论基础;同时考虑到待处理水体水质组成和性质随季节和区域而复杂多变,将制备的复合絮凝剂在模拟印染废水和模拟地表水两种水体的混凝沉淀处理中进行了应

用,并探讨了其絮凝作用机制.

1 材料与方法

1.1 实验材料和仪器

$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (A. R.); 无水 Na_2CO_3 (A. R.); $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ (A. R.); 环氧氯丙烷 (A. R.); 二甲胺 (C. P.); 乙二胺 (A. R.); Ferron 试剂; 活性艳红; 活性翠蓝; 腐殖酸; 高岭土.

ZR4-6 型混凝实验搅拌机 (深圳市中润水工业技术发展有限公司); FA2004N 型电子天平 (上海精密科学仪器有限公司); 78-1 型磁力加热搅拌器 (江苏省金坛市医疗仪器厂); WFZ756 紫外可见分光光度计 (上海光谱有限公司); HH. S 精密恒温水浴锅 (江苏省金坛市医疗仪器厂); 2100P 型便携式液体浊度仪 (美国 Hach 公司); TOC-V_{CPH} 型 TOC 测定仪 (日本岛津公司); JS-94H 型微电泳仪; NDJ-79 旋转式黏度计.

1.2 实验方法

1.2.1 混凝剂的制备

PFC 的制备:取一定质量的 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 固体于烧杯中,加入一定量蒸馏水,在磁力搅拌下至完全溶解,然后按预定的碱化度 $B([\text{OH}^-]/[\text{Fe}])$ 加入一定质量的无水 Na_2CO_3 粉末,待泡沫消失后,继续在磁力搅拌下按照 $n(\text{P})/n(\text{Fe})=0.08$ 的比例加入稳定剂 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 粉末,待样品完全溶解后继续搅拌熟化 1h 后稀释至一定浓度,制得 PFC 混凝剂^[20].

P(EPI-DMA) 的制备:在 $10 \sim 20^\circ\text{C}$ 的恒温水浴下,向 250 mL 带有搅拌及回流冷凝器的四口瓶中按计量加入二甲胺,开启搅拌器,然后使用冰水浴二甲胺降温到 10°C 以下,之后打开回流冷凝器的冷却水,在持续搅拌下用分液漏斗滴加环氧氯丙烷,在控制滴加速度的同时加强冷却,使反应器内的温度控制在 $10 \sim 20^\circ\text{C}$,滴加完毕后再加入乙二胺作交联剂,使共聚产物由原来的直链变为更长的链并且出现一定支链,相对分子质量大大提高. 反应过程中控制整个滴加时间为 2 h. 之后在继续搅拌下缓慢升温至 $60 \sim 75^\circ\text{C}$,反应 5~7 h 后,得到合成的产品聚合物 P(EPI-DMA),合成过程的反应式如图 1 所示^[21]. 合成的聚合物用旋转式黏度计测定其黏度^[21].

复合絮凝剂 [PFC-P(EPI-DMA)] 的制备:在剧烈搅拌下向不同 B 值的 PFC 溶液中加入一定质量、一定黏度值 (140、850、4 200 $\text{mPa} \cdot \text{s}$) 的 P(EPI-

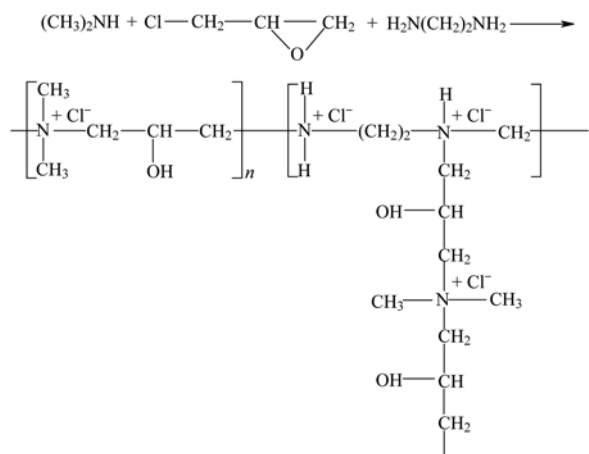


图1 P(EPI-DMA)的合成反应式

Fig. 1 Synthetic reaction of P(EPI-DMA)

DMA)聚合物,持续搅拌1 h后稀释至一定浓度,从而制备得到具有不同 B 值(0.3、0.5、0.8)、不同P(EPI-DMA)质量分数 $[\omega(\text{E})$ 为2%~10.5%]及黏度(η 为140、850、4 200 mPa·s)的PFC-P(EPI-DMA)复合絮凝剂^[22]。

1.2.2 实验水样的制备

模拟染料废水:在印染废水处理中,不溶于水的疏水性或分散性染料脱色过程较易,而被广泛应用于纺织印染业的亲水性或水溶性活性染料脱色过程则较难^[22]。因而本研究选取了具有代表性的活性红和活性蓝两种活性染料作为模拟染料废水的主要成分。其制备方法为:称取0.5 g的活性艳红或活性翠蓝固体加入到10 L自来水中,搅拌混合均匀,制得活性染料浓度为50 mg·L⁻¹的单品种模拟染料废水,以排除实际废水中其他组分对脱色效果的干扰。

模拟天然地表水(高岭土+腐殖酸)水样:向自来水和去离子水体积比例为1:1的水样中加入一定量的腐殖酸和高岭土原液,制得浊度为15.0 NTU、腐殖酸浓度为10 mg·L⁻¹(UV_{254} 为0.041~0.049 cm⁻¹; DOC为3.835~4.796 mg·L⁻¹)的模拟地表水水样。

1.2.3 混凝效果实验

本实验在ZR4-6型混凝实验搅拌机上采用正交实验筛选出的混凝搅拌条件进行混凝效果实验,混凝烧杯的体积为1 L。在处理模拟活性染料废水时,取500 mL模拟染料废水,于120 r·min⁻¹下快速搅拌30 s充分混匀后加入一定量的絮凝剂,继续快搅2.5 min,然后在40 r·min⁻¹下慢速搅拌15 min,静置沉淀20 min后取一定高度上清液在最大吸收波长处测定吸光度值并计算去除率。在处理模拟天然

地表水水样时,于120 r·min⁻¹快速搅拌下向500 mL模拟水样中加入一定量的絮凝剂,继续快搅2.5 min后在40 r·min⁻¹下慢搅15 min,静沉15 min后取一定高度的上清液测定相关水质指标。

1.2.4 相关水质指标的测定方法

水样浊度使用2100P型便携式液体浊度仪直接测得; UV_{254} 是将混凝后上清液通过0.45 μm醋酸纤维滤膜过滤后用紫外可见分光光度计在254 nm下测定的吸光度;DOC是将混凝后上清液通过0.45 μm醋酸纤维滤膜过滤后用TOC-V_{CPH}型TOC测定仪测得的溶解性有机碳的浓度;混凝后絮体的ZETA电位采用JS-94H型微电泳仪直接测得。

1.2.5 Fe(Ⅲ)水解聚合形态的测定

PFC-P(EPI-DMA)复合絮凝剂中Fe(Ⅲ)采用Fe-Ferron逐时络合比色法测得^[23]。根据不同Fe(Ⅲ)的水解聚合形态与Ferron试剂络合的速率不同,可将铁的总量 Fe_T 区分为3部分:即 Fe_a 、 Fe_b 和 Fe_c 。 Fe_a 是指瞬间(30 s内)与Ferron试剂反应的铁,包括自由铁离子和铁的单核羟基络合物。 Fe_b 为反应进行3 h后,吸光度曲线接近饱和时,这一阶段与Ferron试剂反应的铁的增量, Fe_b 代表一系列铁的多核羟基络合物或称低聚合度铁的无机高分子。 Fe_c 代表铁的高聚物,其值为:

$$\text{Fe}_c = \text{Fe}_T - (\text{Fe}_a + \text{Fe}_b)$$

式中, Fe_T 代表铁的总量。

2 结果与讨论

2.1 PFC-P(EPI-DMA)絮凝剂中Fe(Ⅲ)水解聚合形态的研究

2.1.1 P(EPI-DMA)的存在对Fe-Ferron逐时络合比色法的影响

Fe-Ferron逐时络合比色法是用于研究纯铁盐溶液中的铁的形态分布的方法,因此在PFC-P(EPI-DMA)复合絮凝剂溶液中,首先探讨P(EPI-DMA)的存在是否对该测定方法有影响。向同样体积的Ferron溶液加入不同质量的P(EPI-DMA)溶液,以去离子水作空白测定吸光度。研究发现,当P(EPI-DMA)的浓度分别为0、2.0、4.0、6.0、8.0、10.0 mg·L⁻¹时,其吸光度分别为0.003、0.004、0.003、0.003和0.004,可见P(EPI-DMA)未与Ferron试剂发生反应,其存在对Fe-Ferron逐时络合比色法不产生影响。

2.1.2 $\omega(\text{E})$ 值对铁的形态分布的影响

测定不同 $\omega(\text{E})$ 值(3.5%、7%、10.5%)的PFC-

P(EPI-DMA) ($B=0.5$, $\eta=4\,200\text{ mPa}\cdot\text{s}$) 中铁的各种水解形态所占质量分数,实验结果如图2所示。

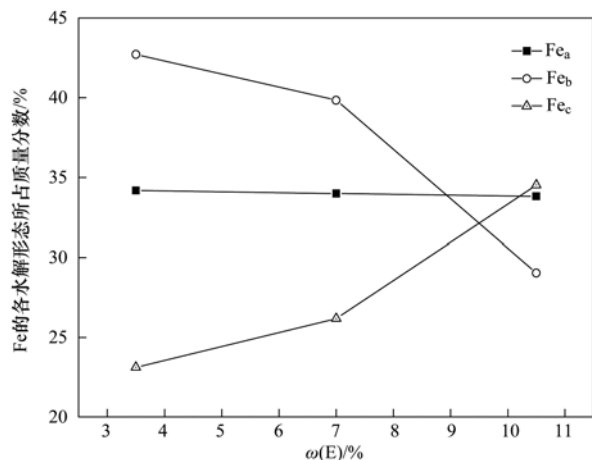


图2 $\omega(\text{E})$ 值对铁的水解形态分布的影响

Fig. 2 Effect of $\omega(\text{E})$ value on the Fe speciation distribution of PFC-P(EPI-DMA)

实验结果表明, Fe_a 含量随着 $\omega(\text{E})$ 值的增大逐渐减少,但是差别很小; Fe_b 含量随着 $\omega(\text{E})$ 值的增大而不断减少;而 Fe_c 含量则随着 $\omega(\text{E})$ 值的增大不断增大。PFC在合成初期,各种不同的 $\text{Fe}(\text{III})$ 聚合物之间会互相转化,而影响这种转化趋势的主要因素为体系中存在的 OH^- 离子。在 PFC-P(EPI-DMA)复合混凝剂溶液中,P(EPI-DMA)的加入会破坏PFC溶液中原来的 OH^- 与 H^+ 之间的平衡。由于P(EPI-DMA)的pH值较高,会促使Fe盐的水解聚合反应不断向右进行,从而生成具有更高聚合形态的 $\text{Fe}(\text{III})$ 聚合物。从而表现出随着 $\omega(\text{E})$ 值的增大, Fe_a 和 Fe_b 的含量不断减少,而 Fe_c 的含量则不断增大。

Fe_a 与 Fe_b , 尤其 Fe_b 被认为是铁盐混凝剂的有效作用形态^[24];可见当PFC溶液中加入有机物P(EPI-DMA)时,铁的有效形态含量均随 $\omega(\text{E})$ 的增大而不断降低。这说明在PFC-P(EPI-DMA)复合混凝剂制备中,控制 $\omega(\text{E})$ 值以制备高效复合铁盐混凝剂十分必要。

2.1.3 η 值对铁的形态分布的影响

测定不同 η 值(140、850、4 200 $\text{mPa}\cdot\text{s}$)的PFC-P(EPI-DMA) [$\omega(\text{E})=7\%$, $B=0.5$] 中铁的各种水解形态含量,实验结果如图3所示。

从图3可以看出,P(EPI-DMA)的 η 值对PFC-P(EPI-DMA)复合混凝剂中铁的水解聚合形态有一定的影响。随 η 的增加, Fe_a 的含量不断减少; Fe_b 的含量先增加后减少;而 Fe_c 的含量则先减少后增

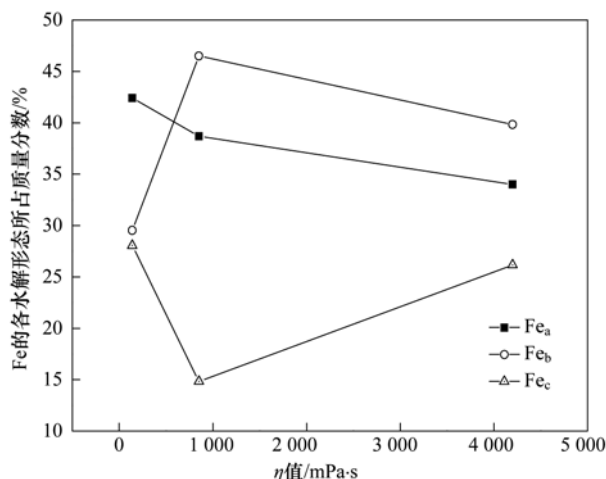


图3 η 值对铁的水解形态分布的影响

Fig. 3 Effect of η value on the Fe speciation distribution of PFC-P(EPI-DMA)

加。当 $\eta=850\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 时,PFC-P(EPI-DMA) 中铁的有效形态含量最高。

2.1.4 B 值对铁的形态分布的影响

测定不同 B 值(0.3、0.5、0.8)的PFC-P(EPI-DMA) [$\omega(\text{E})=7\%$, $\eta=850\text{ mPa}\cdot\text{s}$] 中铁的各种水解形态含量,实验结果如图4所示。

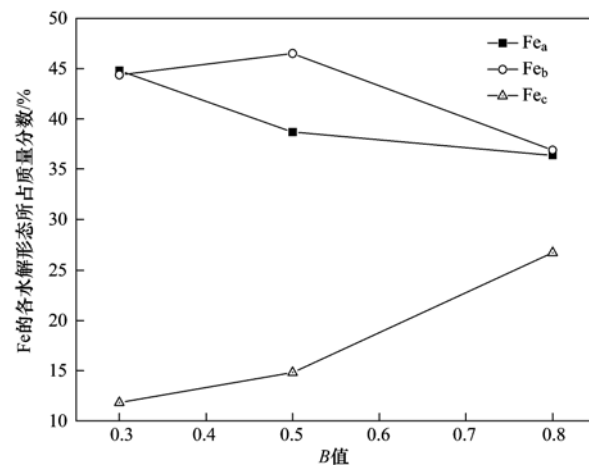


图4 B 值对铁的水解形态分布的影响

Fig. 4 Effect of B value on the Fe speciation distribution of PFC-P(EPI-DMA)

结果表明,PFC的 B 值对PFC-P(EPI-DMA)复合混凝剂中铁的各种水解聚合形态有一定的影响。 Fe_a 的含量随着 B 值的增加不断减少; Fe_b 的含量随着 B 值的增加先增加后减少;而 Fe_c 的含量则随着 B 值的增加不断增加。仅以 Fe_b 含量来看,当 $B=0.5$ 时,PFC-P(EPI-DMA)复合混凝剂中 Fe_b 的含量最高。 B 值代表了铁盐混凝剂的预水解程度。当 B 值不断增大,铁盐混凝剂中 $\text{Fe}(\text{III})$ 的水解

形态逐渐从单体向聚合态转化,当 B 值进一步增大, $\text{Fe}(\text{III})$ 的水解形态则进一步从聚合态向高聚物转化^[25]. 这表明随着 B 值的不断增大, Fe_a 将逐渐转化为 Fe_b , 并且 Fe_b 也将逐渐地转化为 Fe_c . 因此, 在 PFC-P(EPI-DMA) 复合絮凝剂中, 随着 B 值的不断增大, Fe_b 的含量先增大后减少, 而 Fe_c 的含量将逐渐增大.

2.2 PFC-P(EPI-DMA) 处理模拟染料废水的混凝效果及混凝机制

2.2.1 $\omega(\text{E})$ 值对脱色效果的影响

采用不同 $\omega(\text{E})$ 值 (3.5%、7%、10.5%) 的 PFC-P(EPI-DMA) ($\eta = 4\,200\text{ mPa}\cdot\text{s}$, $B = 0.5$) 处理模拟活性艳红和活性翠蓝染料废水, 实验结果如图 5 所示.

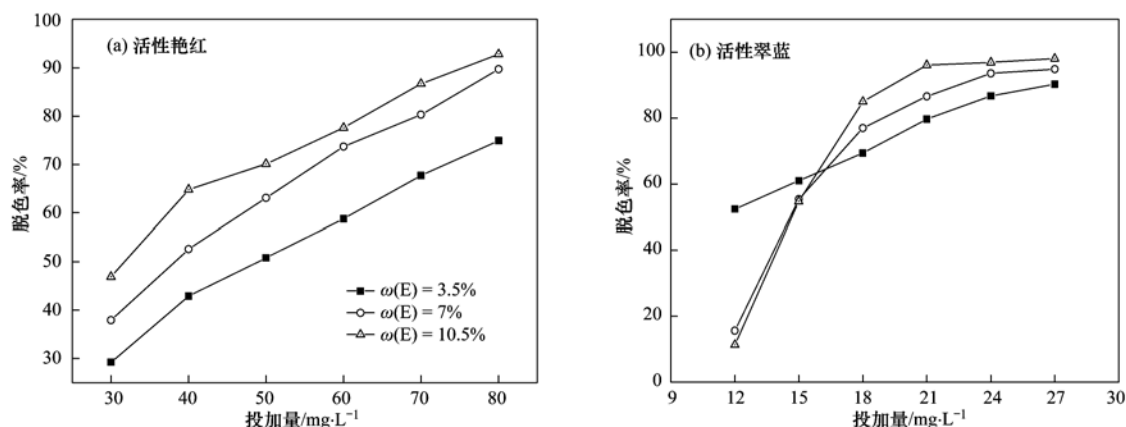


图 5 $\omega(\text{E})$ 值对模拟染料废水脱色效果的影响

Fig. 5 Effect of $\omega(\text{E})$ value on the coagulation effect of PFC-P(EPI-DMA)

从图 5 中可以看出, 3 种 $\omega(\text{E})$ 值的 PFC-P(EPI-DMA) 复合絮凝剂对两种模拟染料废水的脱色效果均随投加量的增加而升高. 处理模拟活性艳红染料废水时, $\omega(\text{E})$ 值越大, 脱色效果越好. 而处理活性翠蓝模拟染料废水时, 当投加量低于 $16\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, $\omega(\text{E})$ 值越小, 复合絮凝剂脱色效率越高, 而当投加量超过 $16\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, $\omega(\text{E})$ 值越大, 其脱色效果越好. 因此, 在一定范围内增大 $\omega(\text{E})$ 值可以明显提高 PFC-P(EPI-DMA) 的混凝性能, 降低絮凝剂的投加量, 但由于 P(EPI-DMA) 的价格较高, 增大 $\omega(\text{E})$ 值将增加药剂成本, $\omega(\text{E})$ 值不宜过高.

2.2.2 η 值对脱色效果的影响

使用不同 η 值 (140、850、4 200 $\text{mPa}\cdot\text{s}$) 的 PFC-P(EPI-DMA) [$\omega(\text{E}) = 7\%$, $B = 0.5$] 处理模拟染料废水, 实验结果如图 6 所示.

实验结果表明, 不同 η 值的 PFC-P(EPI-DMA) 对两种模拟染料废水的脱色率均随着投加量的增加而增大. 处理活性艳红染料废水时, $\eta = 140\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 的 PFC-P(EPI-DMA) 在投加量为 $120\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时其脱色效率仅为 35% 左右, 而 $\eta = 4\,200\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 的 PFC-P(EPI-DMA) 在投加量仅为 $30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时其脱色率就达到 47%. 处理活性翠蓝染料废水时, η 值

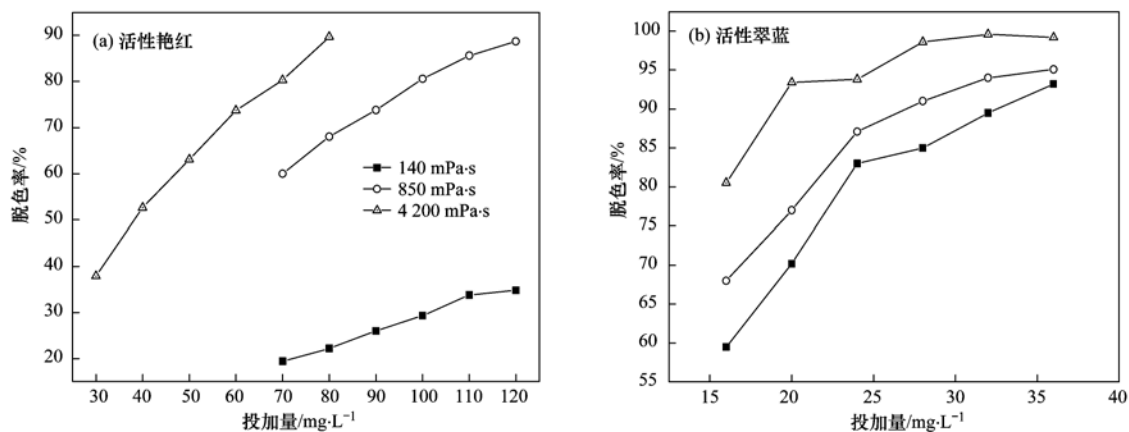


图 6 η 值对活性艳红模拟染料废水脱色效果的影响

Fig. 6 Effect of η value on the coagulation effect of PFC-P(EPI-DMA)

分别为 140、850、4 200 mPa·s 的 PFC-P (EPI-DMA) 在投加量为 $16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时其脱色率分别为 59.5%、68.0% 和 80.5%。这表明 η 值对 PFC-P (EPI-DMA) 脱色效果的影响较大, η 值越高, 脱色效果越好。其原因是 PFC-P (EPI-DMA) 复合混凝剂体系中 P (EPI-DMA) 的 η 值愈大, 相对分子质量越大, 分子链增长, 吸附架桥的能力增强, 正电荷点位增多, 因而更易被胶体颗粒吸附, 同时更有

效地中和颗粒表面的负电荷。因此, 提高 η 值可明显提高 PFC-P (EPI-DMA) 复合絮凝剂的絮凝性能, 但也会因交联剂添加量的增多而增加药剂合成成本。

2.2.3 B 值对脱色效果的影响

采用不同 B 值 (0.3、0.5、0.8) 的 PFC-P (EPI-DMA) [$\eta = 850 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, $\omega(\text{E}) = 7\%$] 处理模拟染料废水, 结果如图 7 所示。

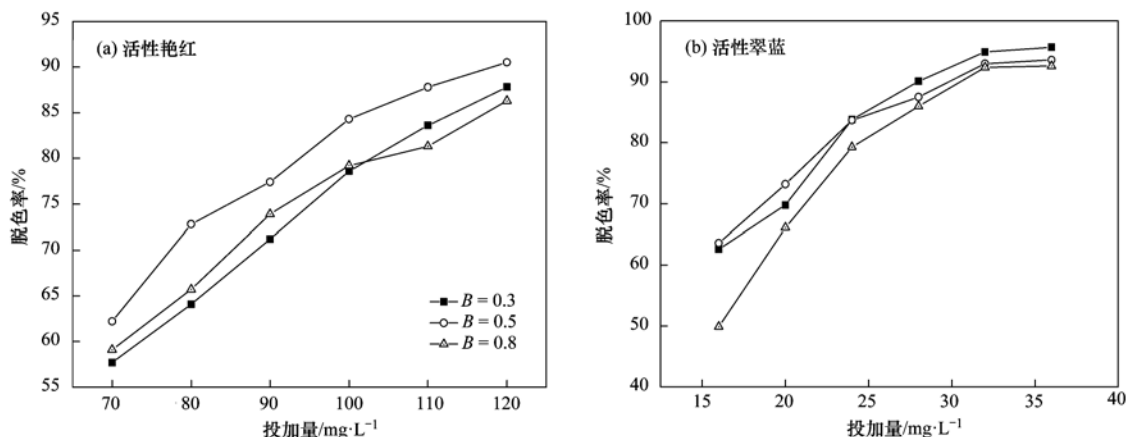


图 7 B 值对模拟染料废水脱色效果的影响

Fig. 7 Effect of B value on the coagulation effect of PFC-P(EPI-DMA)

从图 7 可以看出, B 值对 PFC-P (EPI-DMA) 复合混凝剂脱色效果影响较小, 3 种 B 值的复合混凝剂在相同投加量下其脱色率相差不大。处理模拟活性艳红染料废水时, 在投加量范围内 $B = 0.5$ 的 PFC-P (EPI-DMA) 脱色效果最好。在低投加量范围内 $B = 0.8$ 和 $B = 0.3$ 的 PFC-P (EPI-DMA) 相比, 前者的脱色率较高; 而在高投加量范围内则相反, 后者脱色率较高。处理模拟活性翠蓝染料废水中, 当投加量低于 $24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, $B = 0.5$ 的 PFC-P (EPI-DMA) 脱色效率最高; $B = 0.3$ 时次之; $B = 0.8$ 时脱色效率最低; 当投加量高于 $24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, B 值越大, 该复合混凝剂的脱色率越低。由此可以看出, PFC-P (EPI-DMA) 复合混凝剂存在一个适宜的 B 值范围, 总体来说 B 值较低时 (0.3 ~ 0.5) 脱色效率较高。这是因为 B 值较低时, PFC-P (EPI-DMA) 中 $\text{Fe}(\text{III})$ 的形态以低聚物为主, 胶粒正电荷量大, 可发挥良好的吸附电荷中和与凝聚脱稳作用, 且伴随着 $\text{Fe}(\text{III})$ 的快速水解聚合, 可发挥良好的专属吸附、粘结架桥及卷扫混凝作用。 B 值较高时, $\text{Fe}(\text{III})$ 的形态逐渐转化为以低正电荷的高聚物为主, 投加后易转化为 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 沉淀物, 难以发挥吸附电荷中和与凝聚脱稳作用, 更多地表现出粘结架

桥和卷扫混凝作用, 混凝效果明显降低^[26]。因此选择适宜的 B 值可提高 PFC-P (EPI-DMA) 复合混凝剂的混凝效果。

2.3 PFC-EPI-DAM 处理模拟地表水混凝效果浅析

2.3.1 $\omega(\text{E})$ 值对混凝效果的影响

采用不同 $\omega(\text{E})$ 值 (2%、3.5%、5%、7%、10.5%) 的 PFC-P (EPI-DMA) ($\eta = 850 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, $B = 0.5$) 处理模拟天然地表水水样, 并与 PFC ($B = 0.5$) 进行对比, 考察 $\omega(\text{E})$ 值对浊度、 UV_{254} 和 DOC 去除效果的影响, 结果如图 8 所示。

实验结果表明, 在实验投加量范围内, 不同 $\omega(\text{E})$ 值的 PFC-P (EPI-DMA) 对浊度、 UV_{254} 和 DOC 的去除效果均弱于 PFC。在同一投加量下, 不同 $\omega(\text{E})$ 值的 PFC-P (EPI-DMA) 的混凝效果比较发现, $\omega(\text{E})$ 值为 2% 的 PFC-P (EPI-DMA) 对浊度、 UV_{254} 和 DOC 的去除效果均最大。这表明, 提高 $\omega(\text{E})$ 值, 在一定程度上反而会降低 PFC-P (EPI-DMA) 的混凝效果。复合絮凝剂投加量高于 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 后 DOC 去除率下降的原因为: 高投加量下复合絮凝剂中有机高分子聚合物组分本身造成出水中 DOC 含量的升高。

2.3.2 η 值对混凝效果的影响

使用不同 η 值 (140、850、4 200 mPa·s) 的

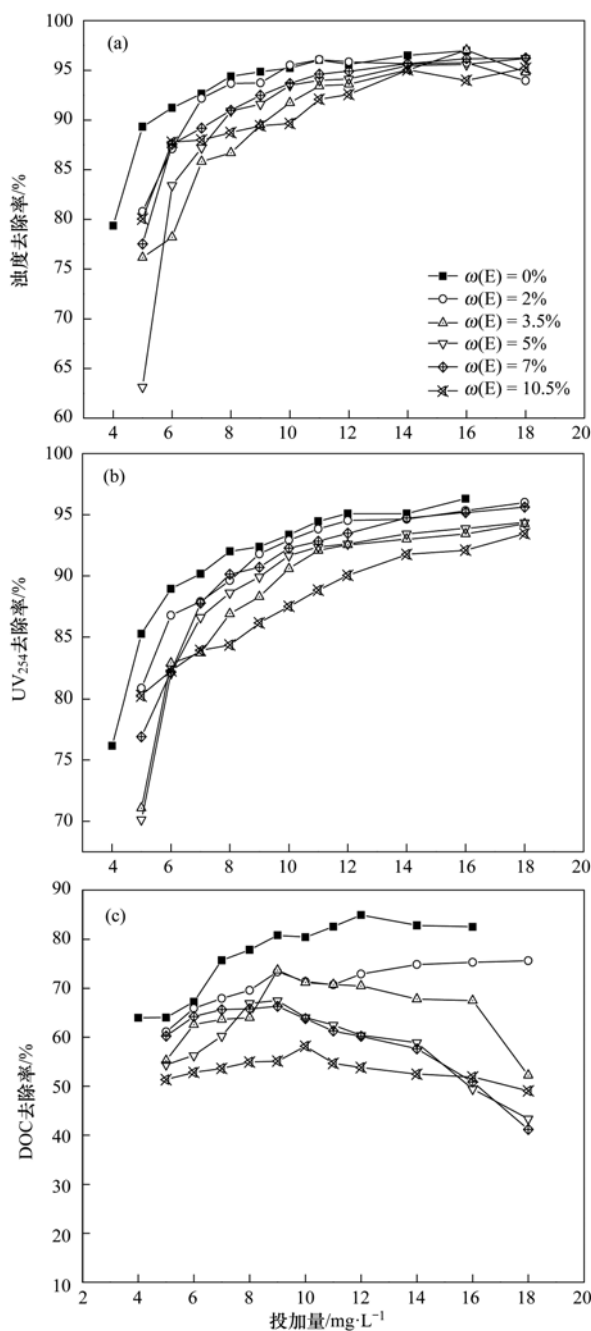
图8 $\omega(E)$ 值对混凝效果的影响

Fig. 8 Effect of $\omega(E)$ value on the coagulation effect of PFC-P(EPI-DMA)

PFC-P(EPI-DMA) [$\omega(E) = 7\%$, $B = 0.5$] 处理模拟天然地表水水样, 考察 η 值对浊度、 UV_{254} 和溶解性有机物(DOC)去除效果的影响, 实验结果如图9所示。

实验结果表明, η 值对 PFC-P(EPI-DMA) 的浊度和 UV_{254} 去除效果影响较小, 但对 DOC 去除效果影响较大。随着投加量的增大, 不同 η 值的 PFC-P(EPI-DMA) 对浊度和 UV_{254} 去除效果均先大幅度提

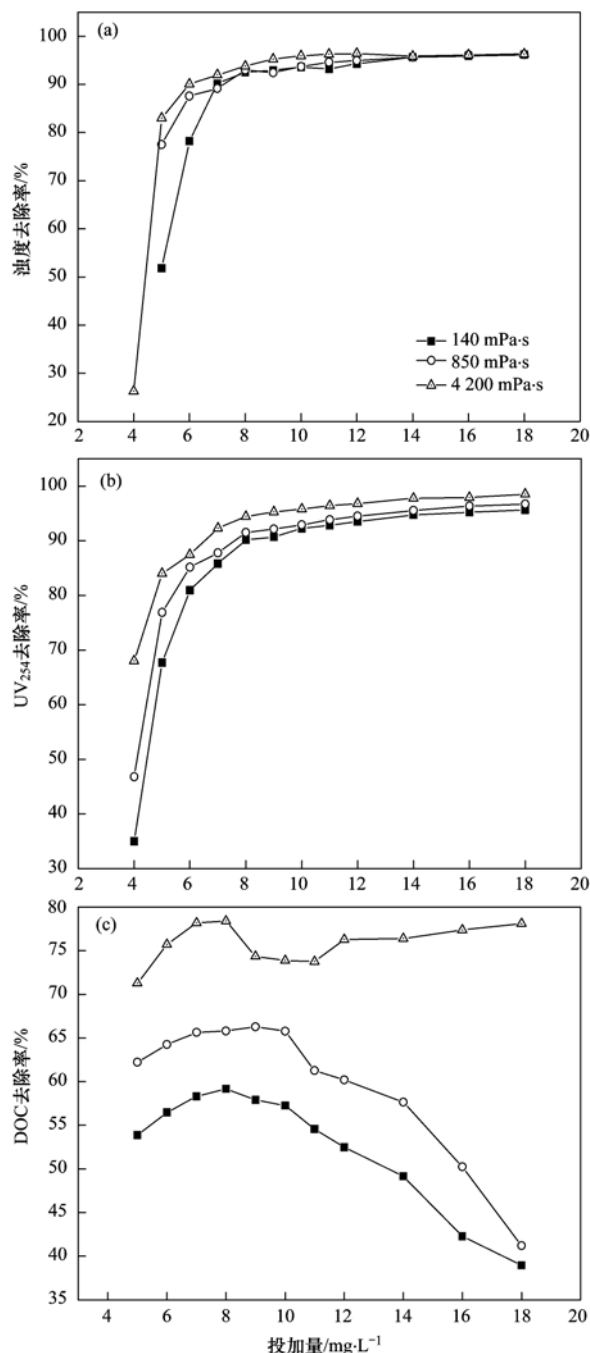
图9 η 值对混凝效果的影响

Fig. 9 Effect of η value on the coagulation effect of PFC-P(EPI-DMA)

高然后变化较小。随着投加量的增大, η 值为 140 mPa·s 和 850 mPa·s 的 PFC-P(EPI-DMA) 的 DOC 去除率先增大后减小, 而 η 值为 4200 mPa·s 的 PFC-P(EPI-DMA) 的 DOC 去除率则是先增大后减小然后再次增大。在同一投加量下, η 值越大, PFC-P(EPI-DMA) 的浊度、 UV_{254} 和 DOC 去除效果越好。这表明提高 PFC-P(EPI-DMA) 复合絮凝剂体系中有有机部分的黏度 η 值可以在一定程度上提高其对模拟天然

地表水的混凝效果。

2.3.3 B 值对混凝效果的影响

采用不同 B 值(0.3、0.5、0.8)的 PFC-P(EPI-DMA) [$\eta = 850 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, $\omega(\text{E}) = 7\%$] 处理模拟天然地表水水样,考察 B 值对浊度、 UV_{254} 和 DOC 去除效果的影响,实验结果如图 10 所示。

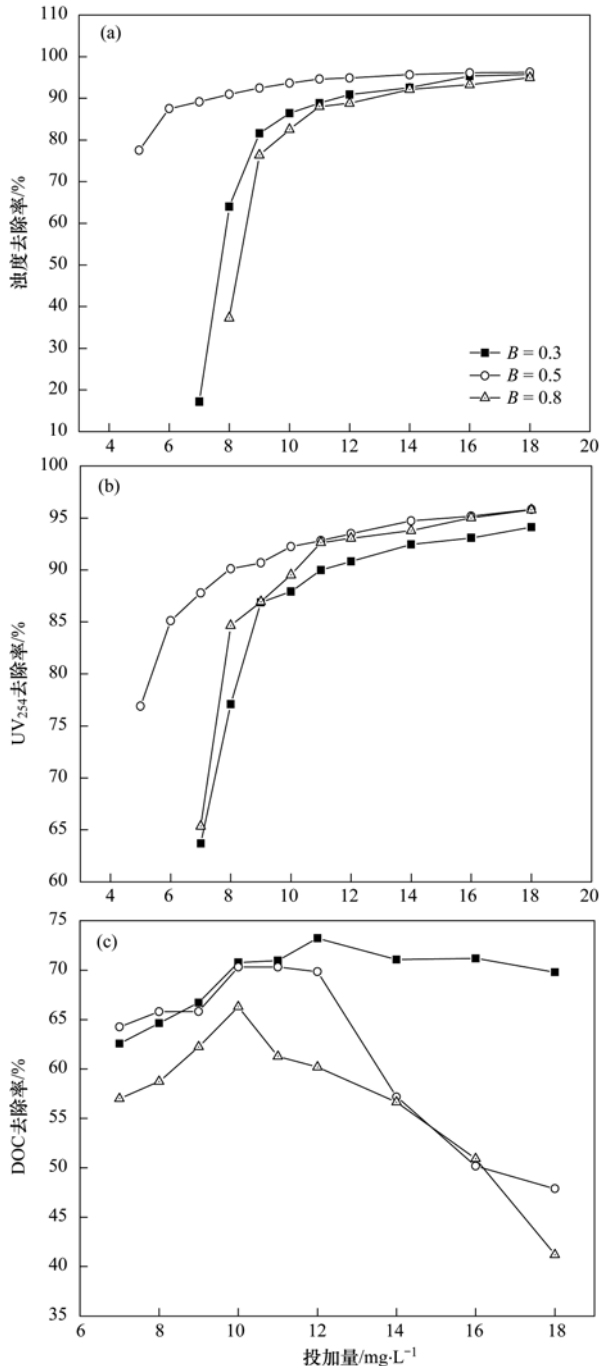


图 10 B 值对混凝效果的影响

Fig. 10 Effect of B value on the coagulation effect of PFC-P(EPI-DMA)

实验结果表明, B 值对 PFC-P(EPI-DMA) 的浊度和 UV_{254} 去除效果影响较小,但对 DOC 去除效果

影响较大. 随着投加量的增大,不同 B 值的 PFC-P(EPI-DMA) 对浊度和 UV_{254} 去除效果均先大幅度提高后缓慢提高,而其对 DOC 的去除效果则是先提高后降低. 不同 B 值的 PFC-P(EPI-DMA) 的混凝效果相比,对于浊度去除效果来说, $B = 0.5$ 的最好, $B = 0.3$ 的次之, $B = 0.8$ 的最差;对于 UV_{254} 去除效果来说, $B = 0.5$ 的最好, $B = 0.8$ 的次之, $B = 0.3$ 的最差;对与 DOC 去除效果来说,在较低投加量 ($\leq 8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 下, $B = 0.5$ 的去除效果最好,而在较高投加量 ($> 8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 下,随着 B 值的增大,DOC 去除效果逐渐降低. 以上结果表明,预水解程度较低 (B 为 0.3~0.5) 时,PFC-P(EPI-DMA) 复合混凝剂对模拟天然地表水的混凝效果较好。

3 结论

(1) PFC-P(EPI-DMA) 复合混凝剂体系 $\omega(\text{E})$ 值、 η 值和 B 值均会对复合混凝剂中铁的形态分布产生影响。

(2) PFC 的碱化度 B 值、P(EPI-DMA) 的质量分数 $\omega(\text{E})$ 值和黏度 η 值对 PFC-P(EPI-DMA) 处理模拟染料废水和模拟天然地表水的混凝性能均有一定的影响,一定程度上使用预水解程度较低、有机成分黏度较大的 PFC-P(EPI-DMA) 有利于混凝效果的提高,复合混凝剂中有机成分质量分数对混凝效果的影响则与处理对象有关。

参考文献:

- [1] 张跃军, 李潇潇. 微污染原水强化处理技术研究进展 [J]. 精细化工, 2011, 28(1): 1-9.
- [2] 李小云, 黄晓菊. 絮凝沉降技术在水处理中的应用研究 [J]. 北方环境, 2011, 23(10): 34-36.
- [3] Dihang D, Aimar P, Kayem J, et al. Coagulation and flocculation of laterite suspensions with low levels of aluminum chloride and polyacrylamids [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2008, 47(9-10): 1509-1519.
- [4] 肖定华. 降低饮用水中残余铝的中试研究 [J]. 供水技术, 2011, 5(4): 14-17.
- [5] 周维芝, 王燕, 高宝玉. 聚合氯化铁与有机高分子聚合物复合絮凝剂中铁的形态分布 [J]. 山东大学学报(理学版), 2005, 40(5): 102-106.
- [6] 齐心, 黄文龙. 无机高分子聚合铁盐混凝剂的新研究进展 [J]. 化学工程与装备, 2011, (9): 188-189.
- [7] 李潇潇, 张跃军, 贾进洲. 聚合硫酸铁复合混凝剂处理秋季长江水研究 [J]. 工业水处理, 2011, 31(10): 46-49.
- [8] 高宝玉. 水和废水处理用复合高分子絮凝剂的研究进展 [J]. 环境化学, 2011, 30(1): 337-345.
- [9] 孙逊, 高宝玉, 张栋华, 等. 环氧氯丙烷-二甲胺聚合物和聚

- 合氯化铝用于印染废水的处理 [J]. 环境化学, 2007, **26**(1): 51-54.
- [10] 陈婷, 高宝玉, 岳钦艳. PFC 与 EPI-DMA 复配絮凝处理模拟染料废水的性能研究 [J]. 山东大学学报(工学版), 2010, **40**(1): 103-107.
- [11] Yan M Q, Wang D S, Qu J H, *et al.* Relative importance of hydrolyzed Al(III) species (Al_a , Al_b , Al_c) during coagulation with polyaluminum chloride: A case study with the typical micro-polluted source waters [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2007, **316**(2): 482-489.
- [12] 徐秀明, 王燕, 高宝玉, 等. 聚合氯化铝中 Al_b 形态去除腐殖酸的效果及机制研究 [J]. 环境科学, 2008, **29**(11): 3064-3070.
- [13] Duan J M, Gregory J. Coagulation by hydrolysing metal salts [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2003, **100-102**: 475-502.
- [14] 高宝玉, 张华, 岳钦艳, 等. 有机絮凝剂聚环氧氯丙烷胺的脱色性能研究 [J]. 工业水处理, 2005, **25**(10): 39-41.
- [15] 高宝玉, 孙逊, 岳钦艳, 等. 不同交联剂制备的环氧氯丙烷-二甲胺聚合物的结构及脱色性能 [J]. 环境科学学报, 2006, **26**(12): 1977-1982.
- [16] 孙逊, 高宝玉, 岳钦艳, 等. 聚环氧氯丙烷胺系列絮凝剂的脱色性能研究 [J]. 水处理技术, 2007, **33**(6): 22-24.
- [17] Wang Y F, Gao B Y, Yue Q Y, *et al.* Flocculation performance of epichlorohydrin-dimethylamine polyamine in treating dyeing wastewater [J]. Journal of Environmental Management, 2009, **91**(2): 423-431.
- [18] Wang Y F, Gao B Y, Yue Q Y, *et al.* Effect of viscosity, basicity and organic content of composite flocculant on the decolorization performance and mechanism for reactive dyeing wastewater [J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, **23**(10): 1626-1633.
- [19] Bolto B, Gregory J. Organic polyelectrolytes in water treatment [J]. Water Research, 2007, **41**(11): 2301-2324.
- [20] 魏锦程, 高宝玉, 王燕, 等. 聚合铁与季铵盐复合絮凝剂处理造纸中段水的性能 [J]. 精细化工, 2007, **24**(3): 278-281.
- [21] 高宝玉, 张华, 岳钦艳, 等. 聚环氧氯丙烷胺的制备及其脱色性能 [J]. 精细化工, 2005, **22**(8): 611-615.
- [22] Gao B Y, Liu B, Chen T, *et al.* Effect of aging period on the characteristics and coagulation behavior of polyferric chloride and polyferric chloride-polyamine composite coagulant for synthetic dyeing wastewater treatment [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **187**(1-3): 413-420.
- [23] 王东升, 汤鸿霄. 聚铁硅型复合无机高分子絮凝剂的形态分布特征 [J]. 环境科学, 2001, **22**(1): 94-97.
- [24] 苗晶, 岳钦艳, 高宝玉. 高浓聚合氯化铁混凝剂的制备及其混凝效果研究 [J]. 工业水处理, 2002, **22**(8): 22-25.
- [25] Wei J C, Gao B Y, Yue Q Y, *et al.* Performance and mechanism of polyferric-quaternary ammonium salt composite flocculants in treating high organic matter and high alkalinity surface water [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **165**(1-3): 789-795.
- [26] 高宝玉, 魏锦程, 王燕, 等. 聚合铁复合絮凝剂处理地表水的性能研究 [J]. 中国给水排水, 2006, **22**(7): 57-61.

CONTENTS

PUF Passive Air Sampling of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere of the Yangtze River Delta, China: Spatio-Temporal Distribution and Potential Sources	ZHANG Li-fei, YANG Wen-long, DONG Liang, <i>et al.</i> (3339)
Quantitative Analysis of Nitrate in Atmospheric Particulates PM _{2.5} with Fourier Transform Infrared Spectroscopy	LIU Na, WEI Xiu-li, GAO Min-guang, <i>et al.</i> (3347)
Study on Contribution Factor to Atmospheric ·OH by O ₃ , HONO, HCHO and H ₂ O ₂ in Spring at Mangdang Mountain, Fujian Province	LIU Hao, WANG Hui-xiang (3352)
A Review on Current Situations of Steroid Estrogen in the Water System	DU Shao-ting, JIN Chong-wei, LIU Yue (3358)
A Study on the Veterinary Antibiotics Contamination in Groundwater of Jiaxing	LÜ Xing, YU Wei-juan, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3368)
Contamination Characteristics of Short-Chain Chlorinated Paraffins in Edible Fish of Shanghai	JIANG Guo, CHEN Lai-guo, HE Qiu-sheng, <i>et al.</i> (3374)
Detection of Endotoxin Activity in Water Environment and Analysis of Influence Factors for TAL Assay	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (3381)
Cellular Response of Freshwater Green Algae to the Toxicity of Tetracycline Antibiotics	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, RAO Gui-wei (3386)
Illumination's Effect on the Growth and Nitrate Reductase Activity of Typical Red-Tide Algae in the East China Sea	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, DING Yan-yan, <i>et al.</i> (3391)
Compare the Growth of <i>Enteromorpha prolifera</i> Under Different Nutrient Conditions	PANG Qiu-ting, LI Feng, LIU Xiang-qing, <i>et al.</i> (3398)
Phytoplankton Pigment Patterns and Community Structure in the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	LAI Jun-xiang, YU Zhi-ming, SONG Xiu-xian, <i>et al.</i> (3405)
Genetic Diversity of Picoeukaryotic Phytoplankton in the Lakes Along the Middle-lower Reaches of the Yangtze River	LI Sheng-nan, SHI Xiao-li, XIE Wei-wei, <i>et al.</i> (3416)
Studies on Seasonal Variation and Sources of Nitrogen and Phosphorus in a Canyon Reservoir Used as Water Source	HUANG Ting-lin, QIN Chang-hai, LI Xuan (3423)
Characteristics of Sediment Phosphorus in the Jiulong River-Reservoir System and Its Ecological Significance	LU Ting, CHEN Neng-wang, CHEN Zhu-hong, <i>et al.</i> (3430)
Variation of Nitrogen During the High Suspended Sediments Concentration Water Supply in an Artificial Shallow Lake	CHEN You-yuan, SHEN Yu, YANG Shi-ying (3437)
Limestone and Pyrite-Limestone Constructed Wetlands for Treating River Water	ZHANG Jing, LI Rui-hua, LI Jie, <i>et al.</i> (3445)
Dynamics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus Storage of Three Dominant Marsh Plants in Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LI Wen-hua, WU Ming, <i>et al.</i> (3451)
Dissolved Organic Matter Release of <i>Zizania caduciflora</i> and <i>Phragmites australis</i> from Lake Dianchi	XIE Li, YANG Hao, QU Xiao-xia, <i>et al.</i> (3458)
Influence of Tap Water Treatment on Perfluorinated Compounds Residue in the Dissolved Phase	ZHANG Hong, CHEN Qing-wu, WANG Xin-xuan, <i>et al.</i> (3467)
Study on Chlorinated Disinfection Byproducts and the Relevant Health Risk in Tap Water of J City	LI Xiao-ling, LIU Rui, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3474)
Effect of the Change in Sulphate and Dissolved Oxygen Mass Concentration on Metal Release in Old Cast Iron Distribution Pipes	WU Yong-li, SHI Bao-you, SUN Hui-fang, <i>et al.</i> (3480)
Research on Low-level Hg(II) Removal from Water by the Heavy Metal Capturing Agent	HU Yun-jun, SHENG Tian-tian, XUE Xiao-qin, <i>et al.</i> (3486)
Coagulation Characteristics of Polyferric Chloride-Poly (Epichlorohydrin-Dimethylamine) Composite Flocculant for Simulated Water Treatment	LIU Xin-xin, YANG Zhong-lian, GAO Bao-yu, <i>et al.</i> (3493)
Microstructure Morphology and Flocculation Mechanism of the Decolorizing Flocculant Poly-aluminum(III)-magnesium(II)-sulfate	SANG Yi-min, CHANG Xue-hong, CHE Yue, <i>et al.</i> (3502)
Efficient Degradation of Tetrabromobisphenol A in Water by Co-doped BiFeO ₃	OUYANG Lei, DING Yao-bin, ZHU Li-hua, <i>et al.</i> (3507)
Preparation Bimetallic Heterogeneous Fenton-Like Catalyst as Sepiolite Supported and Its Surface Chemical Characterization	SU Cheng-yuan, LI Wei-guang, LIU Xing-zhe, <i>et al.</i> (3513)
Nitrite Denitrification Characteristics with Redox Mediator	ZHAO Li-jun, MA Zhi-yuan, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (3520)
Advanced Nitrogen Removal Using Innovative Denitrification Biofilter with Sustained-Release Carbon Source Material	TANG Lei, LI Peng, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (3526)
N ₂ O Production in Nitrogen Removal by Micro-expansion of Granular Sludge	CHEN Li-li, GAO Da-wen (3532)
Sludge Dewaterability with Combined Conditioning Using Fenton's Reagent and CPAM	MA Jun-wei, LIU Jie-wei, CAO Rui, <i>et al.</i> (3538)
Kinetic Characteristics of High-rate ANAMMOX Granules	TANG Chong-jian, XIONG Lei, WANG Yun-yan, <i>et al.</i> (3544)
Monitoring Nitrogen Deposition on Temperate Grassland in Inner Mongolia	ZHANG Ju, KANG Rong-hua, HUANG Bin, <i>et al.</i> (3552)
Non-Point Loads of Soluble Cadmium by <i>in situ</i> Field Experiment with Different Landuses, in Central Hunan Province Mining Area	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, CHEN Zhe, <i>et al.</i> (3557)
Heavy Metal Speciation and Stability in the Sediment of Lihu Lake	WANG Shu-hang, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3562)
Analysis and Evaluation of Heavy Metals Along the Chaohe River in Miyun County	YU Yang, GAO Hong-chao, MA Jun-hua, <i>et al.</i> (3572)
Magnetic Properties of Topsoils in Typical Industrial Belt Along the Yellow River in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Significance	XU Shu-jing, ZHANG Ying, YU Ye, <i>et al.</i> (3578)
Study on Composite Stabilization of Arsenic (As) Contaminated Soil	WANG Hao, PAN Li-xiang, ZHANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (3587)
Heavy Metal Contents and Enrichment Characteristics of Dominant Plants in a Lead-Zinc Tailings in Xiashuiwan of Hunan Province	HE Dong, QIU Bo, PENG Jin-hui, <i>et al.</i> (3595)
Comparison of Soil Fertility Among Open-pit Mine Reclaimed Lands in Antaibao Regenerated with Different Vegetation Types	WANG Xiang, LI Jin-chuan, YUE Xiang-yi, <i>et al.</i> (3601)
Biodegradation of Triphenyltin and Its Effect on <i>Klebsiella pneumoniae</i>	YE Jin-shao, TIAN Yun, YIN Hua, <i>et al.</i> (3607)
Isolation and Degradation Characteristics of Dichloromethane-Degradation Bacterial Strain by <i>Methylobacterium rhodesianum</i> H13	LIU Hong-xia, ZHU Run-ye, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3613)
Effect of Different Primers on Microbial Community of Activated Sludge	XU Ai-ling, WU Deng-deng, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3620)
Reaction of SO ₂ over CaAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites Samples	CAO Lin, WANG Hai-lin, XIE Qiang (3627)
Optimization for MSW Logistics of New Xicheng and New Dongcheng Districts in Beijing Based on the Maximum Capacity of Transfer Stations	YUAN Jing, Li Guo-xue, ZHANG Hong-yu, LUO Yi-ming, <i>et al.</i> (3633)
Application of Multiple Lines of Evidence Analysis Technology in the Assessment of Sites Contaminated by Heavy Metals	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, ZHU Xiao-ying, <i>et al.</i> (3641)
Heavy Metals and Their Sources in Outdoor Settled Dusts in Different Function Areas of Cities	LI Xiao-yan, LIU Yan-qing (3648)
Study on Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Soil Heavy Metals in the Yellow River Beach Region in Kaifeng City	ZHANG Peng-yang, QIN Ming-zhou, YAN Jiang-hong, <i>et al.</i> (3654)
Study on Pollution Evaluation of Heavy Metal in Surface Soil of the Original Site of Qingdao North Station	ZHU Lei, JIA Yong-gang, PAN Yu-ying (3663)
Distribution Characteristics and Ecological Risk of Pb in Soils at a Lead Battery Plant	ZHENG Li-bao, CHEN Wei-ping, JIAO Wei-tao, <i>et al.</i> (3669)
Effect of Lead on Soil Quality and Human Health Around a Lead Smeltery	ZHOU Xiao-yong, LEI Mei, YANG Jun, <i>et al.</i> (3675)
Distribution Characteristics of Lead in Different Particle Size Fractions of Surface Soil of a Lead-acid Battery Factory Contaminated Site	YUE Xi, SUN Ti-chang, HUANG Jin-lou (3679)
Research on the Application of <i>In-situ</i> Biological Stabilization Solidification Technology in Chromium Contaminated Site Management	ZHANG Jian-rong, LI Juan, XU Wei (3684)
Research on the Effect and Technique of Remediation for Multi-Metal Contaminated Tailing Soils	ZHU Guang-xu, GUO Qing-jun, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (3690)
Analysis of Washing Efficiency and Change in Lead Speciation in Lead-contaminated Soil of a Battery Factory	REN Bei, HUANG Jin-lou, MIAO Ming-sheng (3697)
Remediation Efficiency of Lead-Contaminated Soil at an Industrial Site by Ultrasonic-assisted Chemical Extraction	WANG Xin-jie, HUANG Jin-lou, LIU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3704)
Parameters Optimization and Cleaning Efficiency Evaluation of Attrition Scrubbing Remediation of Pb-Contaminated Soil	YANG Wen, HUANG Jin-lou, PENG Hui-qing, <i>et al.</i> (3709)
Adsorption of Cd ²⁺ on Biochar from Aqueous Solution	GUO Wen-juan, LIANG Xue-feng, LIN Da-song, <i>et al.</i> (3716)
Effect of Inorganic Amendments on the Stabilization of Heavy Metals in Contaminated Soils	CAO Meng-hua, ZHU Xi, LIU Huang-cheng, <i>et al.</i> (3722)

《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9月15日 34卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 9 Sep. 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

国内外公开发行人