

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第8期

Vol.33 No.8

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南海北部大气气相多溴联苯醚的含量及来源	李琦路, 李军, 刘向, 徐维海, 张干 (2533)
河北张家口市大气污染观测研究	邵平, 王莉莉, 安俊琳, 周彦丽, 王跃思 (2538)
大气中丙烷光氧化臭氧生成活性的烟雾箱模拟	黄丽华, 莫创荣, 徐永福, 贾龙 (2551)
膜生物反应器处理甲苯性能及机制	叶杞宏, 魏在山, 肖盼, 李华琴, 张再利, 樊青娟 (2558)
厨余垃圾堆肥过程中恶臭物质分析	张红玉, 邹克华, 杨金兵, 李国学, 杨青原, 张锋 (2563)
北京城市生态系统地表水硝酸盐污染空间变化及其来源研究	徐志伟, 张心昱, 任玉芬, 孙晓敏, 王效科, 王升忠 (2569)
枯、平、丰水期长江3条支流表层水中多氯联苯的分布特征及风险评价	李昆, 赵高峰, 周怀东, 曾敏, 廖柏寒, 吴正勇, 张盼伟, 柳敏 (2574)
三峡库区丰水期表层水中酚类的分布特征及潜在风险	吴正勇, 赵高峰, 周怀东, 李科林, 李昆, 张盼伟 (2580)
东湖表层水体中全氟辛酸和全氟辛磺酸空间分布特征	陈静, 王琳玲, 朱湖地, 王贝贝, 刘黄诚, 曹梦华, 苗竹, 胡丽, 陆晓华, 刘光虹 (2586)
三峡库区大宁河与磨刀溪重金属污染特征	安立会, 张艳强, 郑丙辉, 刘玥, 宋双双, 李子成, 陈浩, 赵兴茹, 林进 (2592)
长江水系表层沉积物重金属污染特征及生态风险性评价	王岚, 王亚平, 许春雪, 安子怡 (2599)
江苏如东滩涂贝类养殖区表层沉积物中重金属来源分析及其潜在生物毒性	李磊, 王云龙, 蒋玫, 袁璐, 沈新强 (2607)
扰动强度对太湖沉积物中磷释放及其形态转化的影响	李大鹏, 黄勇 (2614)
干流倒灌异重流对香溪河库湾营养盐的补给作用	张宇, 刘德富, 纪道斌, 杨正健, 陈媛媛 (2621)
常年淹水和干旱对三峡库区消落带菖蒲生长恢复的影响	李强, 高祥, 丁武泉, 朱启红, 欧媛, 刘瑜 (2628)
温州城市降雨径流磷的负荷及其初始冲刷效应	周栋, 陈振楼, 毕春娟 (2634)
沂蒙山区典型小流域降雨径流的磷素输出特征	于兴修, 李振炜, 刘前进, 井光花 (2644)
城郊农业区小流域土地利用结构对氮素输出的影响	杨峰, 王鹏举, 杨珊珊, 吴金水, 胡荣桂 (2652)
基于 AnnAGNPS 模型四岭水库小流域氮磷流失特征的模拟研究	边金云, 王飞儿, 杨佳, 俞洁, 楼莉萍, 俞丹萍 (2659)
基于 GIS 和 L-THIA 模型的深圳市观澜河流域非点源污染负荷变化分析	白凤姣, 李天宏 (2667)
黄土丘陵区坡面水蚀对降雨和下垫面微观格局的响应	卫伟, 贾福岩, 陈利顶, 吴东平, 陈瑾 (2674)
强化混凝对腐殖酸和富里酸去除对比研究	周玲玲, 张永吉, 叶河秀, 张一清 (2680)
九龙江下游水源水中新发病原微生物和抗生素抗性基因的定量 PCR 检测	王青, 林惠荣, 张舒婷, 于鑫 (2685)
布吉河丰水期总细菌和氨氧化细菌的定性和定量研究	孙海美, 白姣姣, 孙卫玲, 邵军 (2691)
曝气生物滤池工艺脱氮性能及反硝化细菌群落结构特征研究	彭晓兰, 刘聪, 陈吕军 (2701)
城市污水处理厂氧化沟工艺微生物种群分析	郭云, 杨殿海, 卢文健 (2709)
IC 反应器处理啤酒废水的效能及其微生物群落动态分析	朱文秀, 黄振兴, 任洪艳, 阮文权 (2715)
原子力显微镜液池成像技术应用于微絮凝过滤工艺过程中的实验条件优化	郑蓓, 葛小鹏, 于志勇, 原盛广, 张文婧, 孙景芳 (2723)
UV/H ₂ O ₂ 法对印染废水生化出水中不同种类有机物的去除效果	李新, 刘勇弟, 孙贤波, 徐宏勇, 钱飞跃, 李欣珏, 李暮 (2728)
蛋白核小球藻 <i>Chlorella pyrenoidosa</i> -15 的异养培养条件优化及污水养殖	王秀锦, 李兆胜, 邢冠岚, 李卓凝, 袁红莉, 杨金水 (2735)
“Fe ⁰ /优势脱氯菌”体系降解 2,4,6-TCP 特性及机制研究	戴友芝, 郭丽丽, 史雷, 刘智勇, 高宝钗 (2741)
树脂 D201 上粗漆酶的固定化及对孔雀石绿的脱色	戚绪亮, 刘翔, 刘波, 王林, 王小春, 方超 (2747)
TiO ₂ /PS/Fe ₃ O ₄ 光催化剂的低温制备及其光催化和磁回收性能	王雪姣, 任学昌, 念娟妮, 肖举强, 王刚, 常青 (2752)
微波加热下苯的催化氧化性能研究	张钰彩, 卜龙利, 王晓晖, 刘海楠, 张浩 (2759)
纳米磁粉协同解偶联剂作用下活性污泥性能的研究	高丽英, 汤兵, 梁玲燕, 黄绍松, 付丰连, 罗建中 (2766)
好氧颗粒污泥沉降选择实验研究与定量描述	苏德足, 邓绣坤, 郑丽, 王畅, 金旺江, 沈俊 (2773)
超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中水解酶活性变化研究	叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝建, 许燕滨, 占星星, 刘敬勇 (2780)
微生物营养剂浓度对生物沥浸法促进城市污泥脱水性能的影响	宋永伟, 刘奋武, 周立祥 (2786)
实验室条件下蓝藻结皮对低温光照胁迫的响应与微结构变化	饶本强, 李华, 熊瑛, 兰书斌, 李敦海, 刘永定 (2793)
西南地区紫色水稻土活性碳库的季节动态	吴艳, 江长胜, 郝庆菊 (2804)
典型设施菜地土壤抗生素污染特征与积累规律研究	尹春艳, 骆永明, 滕应, 章海波, 陈永山, 赵永刚 (2810)
土壤铜硒复合污染中金属形态转化及其对生物有效性的影响	胡斌, 梁东丽, 赵文龙, 缪树寅 (2817)
土壤微生物群落对多环芳烃污染土壤生物修复过程的响应	张晶, 林先贵, 刘魏魏, 尹睿 (2825)
可可毛色二孢菌对焦化厂土壤多环芳烃污染修复	张志远, 王翠苹, 刘海滨, 孙红文 (2832)
广西茶山铈矿尾砂中微量元素的淋滤实验研究	蔡永兵, 李玲, 魏晓飞, 张国平, 李海霞, 付志平 (2840)
北京市近郊区土壤砷累积特征	戚洁, 王美娥, 汪自强, 欧阳志云 (2849)
抗氧化酶基因作为多环麝香污染分子标志物研究	陈春, 周启星, 刘潇威 (2855)
臭气污染对不同品种小麦干物质与生物量碳积累与分配的影响	寇太记, 于伟伟, 朱建国, 朱新开 (2862)
尿素分解共沉淀法中反应时间对 ZnAl 类水滑石结构和磷吸附性能的影响	陆英, 程翔, 邢波, 孙中恩, 孙德智 (2868)
铅和铜离子在纳米羟基磷灰石上的竞争吸附动力学研究	胡田田, 仓龙, 王玉军, 司友斌, 周东美 (2875)
pH 和 Ni ²⁺ 对人工纳米氧化硅吸附菲的影响	罗沛, 孙红文, 张鹏 (2882)
铈在凹凸棒石上的吸附特性与机制研究	刘娟, 陈迪云, 张静, 宋刚, 罗定贵 (2889)
环丙沙星在潮土中的吸附特性	崔皓, 王淑平 (2895)
中高温区水合肼 SNCR 脱硝反应机制和特性研究	洪彦, 陈德珍, 王渡, 黄慷 (2901)
H ₂ S 选择性催化氧化工艺及催化剂研究现状	郝郑平, 冀广玉, 张鑫, 曲思秋 (2909)
《环境科学》征稿简则 (2550) 《环境科学》征订启事 (2568) 信息 (2684, 2714, 2848, 2916)	

强化混凝对腐殖酸和富里酸去除对比研究

周玲玲^{1,3}, 张永吉^{2*}, 叶河秀², 张一清²

(1. 同济大学城市污染控制国家工程研究中心, 上海 200092; 2. 长江水环境教育部重点实验室(同济大学), 上海 200092; 3. 同济大学苏州研究院, 苏州 215000)

摘要:以腐殖酸和富里酸为研究对象,考察了硫酸铝、三氯化铁、聚合氯化铝和聚合氯化铁这 4 种混凝剂的强化混凝效果,并研究了 pH、浊度及 Ca^{2+} 、腐殖酸和富里酸相对含量对强化混凝的影响.结果表明,4 种混凝剂对腐殖酸的去除效果要高于富里酸,三氯化铁和硫酸铝比聚合氯化铝和聚合氯化铁具有更好的混凝效果,在混凝剂投量为 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,三氯化铁、硫酸铝、聚合氯化铁和聚合氯化铝混凝后可将水样中富里酸浓度由 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 分别降为 3.22、4.34、5.85 和 4.86 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而腐殖酸浓度可分别降至 1.13、2.13、3.44 和 2.50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.三氯化铁和硫酸铝强化混凝的最佳 pH 为 5.5~6.5,在其它 pH 范围强化混凝效果降低;水样中有机物浓度越高,混凝效果越差,富里酸/腐殖酸 > 0.4 后混凝效果明显变差.浊度对混凝剂去除有机物的影响较小, Ca^{2+} 浓度的增加可提高腐殖酸和富里酸的去除效果.

关键词:强化混凝;腐殖酸;富里酸;铁盐;铝盐

中图分类号: X52; TU991.25 文献标识码: 文章编号: 0250-3301(2012)08-2680-05

Comparison Study of Enhanced Coagulation on Humic Acid and Fulvic Acid Removal

ZHOU Ling-ling^{1,3}, ZHANG Yong-ji², YE He-xiu², ZHANG Yi-qing²

(1. National Engineering Research Center for Urban Pollution Control, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Yangtze River Water Environment, Ministry of Education (Tongji University), Shanghai 200092, China; 3. Tongji Suzhou Research Institute, Suzhou 215000, China)

Abstract: Enhanced coagulation effects of four coagulants, such as aluminium sulfate, ferric chloride, aluminium polychloride and poly-ferric chloride, were examined, with an emphasis on pH, turbidity, Ca^{2+} and relative contents of humic acid and fulvic acid. The result showed that the removal efficiency of four kinds of coagulant for humic acid was higher than that for fulvic acid. Compared with aluminium polychloride and poly-ferric chloride, aluminium sulfate and ferric chloride possessed a better coagulation effect. At the coagulant dosage of $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, ferric chloride, aluminium sulfate, poly-ferric chloride and aluminium polychloride removed fulvic acid from $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to 3.22 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 4.34 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 5.85 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and 4.86 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ respectively, while the four coagulants removed humic acid from $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to 1.13 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 2.13 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 3.44 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and 2.50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ respectively in water. At pH between 5.5 and 6.5, aluminium sulfate and ferric chloride had the best coagulation effect. The coagulant had the lower efficiency with increase of organic carbon in water. Especially, the content ratio of fulvic acid and humic acid was above 0.4, the coagulation effect markedly decreased. Turbidity has a little influence on organic carbon removal rate. With the concentration of Ca^{2+} , the removal efficiency of humic acid and fulvic acid increased.

Key words: enhanced coagulation; humic acid; fulvic acid; ferric salt; aluminium salt

水体中的天然有机物不仅是色度的主要来源,而且会与金属离子或微量元素螯合,导致水的矿化度低;在水处理过程中天然有机物的存在会导致混凝剂投量增加、污染离子交换树脂、增加消毒副产物生成量等^[1-5],因此对天然有机物的去除成为人们关注的问题.

目前我国大多数水厂采用的常规水处理工艺对天然有机物去除能力较为有限.而在原有工艺基础上通过调节 pH、过量投加混凝剂、优化絮凝条件以及投加预氧化剂等手段对原有工艺进行强化,可以达到对水中天然有机物最大限度去除的目的.有研究对 Chapel Hill 河水进行强化混凝研究时发现,强

化混凝对水中有有机物及消毒副产物前体物具有良好的去除效果,强化混凝的效果取决于 pH、混凝剂的种类和投量、有机物的浓度和种类、以及水中共存离子的特性^[6-8].

本研究探讨了 4 种混凝剂强化混凝对代表性有机物腐殖酸、富里酸的去除效果,同时分析了 pH、有机物种类、浊度和 Ca^{2+} 对强化混凝的影

收稿日期: 2011-09-22; 修订日期: 2012-03-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178323, 51108329); 中国博士后科学基金面上项目(20100480626); 江苏省自然科学基金项目(BK2011323)

作者简介: 周玲玲(1976~),女,博士,主要研究方向为给水深度处理和管网水质保障技术, E-mail: angelina-zhou@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhangyongji@tongji.edu.cn

响, 以期为实际水厂强化混凝工艺的应用提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 腐殖酸和富里酸水样的配制

准确称取 0.5 g 腐殖酸和富里酸(天津生化试剂二厂生产)于烧杯中, 加入 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaOH 热溶液并不停搅拌, 溶解后加入 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 HCl 调节 pH 到 7.0 ± 0.1 , 用 $0.45 \mu\text{m}$ 的滤膜过滤后, 移入 1 000 mL 的容量瓶中定容, 制成腐殖酸和富里酸储备液。使用时用超纯水稀释到 TOC 为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 并调节 pH 为 7.0 ± 0.1 , 同时加入碳酸氢钠和氯化钙各 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 以模拟实际天然水体中的碱度和矿物质。水中的浊度采用投加高岭土来配制。

1.2 杯罐混凝试验

试验采用标准烧杯搅拌试验, 在 DBJ-6 型六联定时变速搅拌器上进行。硫酸铝和三氯化铁采用沈阳化学试剂公司生产产品, 固态聚合氯化铝(Al_2O_3 含量 30%) 和聚合氯化铁(Fe_2O_3 含量 11.5%) 采用巩义市宇升净水材料有限公司生产产品, 混凝剂投量均以 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 计。

1.3 检测方法

TOC 采用岛津公司 TOC-CPN 型总有机碳分析仪测定, 浊度采用哈希 2100 型浊度仪测定, pH 采用梅特勒-托利多 S20K 型 pH 计测定。

2 结果与讨论

2.1 混凝剂投量对腐殖酸和富里酸去除的影响

图 1 是 4 种混凝剂对腐殖酸的去除效果。从中可以看出, 随着混凝剂投量的增加腐殖酸的去除效果不断提高, 在混凝剂投量 $> 40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 后, 增加混凝剂的投量对腐殖酸的去除效果提高幅度不大, 铁

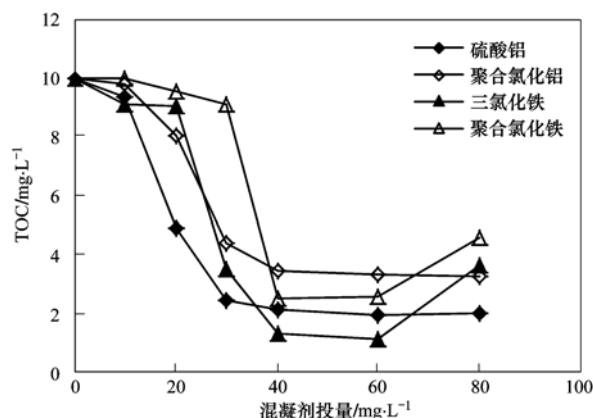


图 1 4 种混凝剂对腐殖酸的去除效果

Fig. 1 Effect of four coagulants on humic acid removal

盐混凝剂还出现了 TOC 升高的现象。在混凝剂投量 $< 30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 硫酸铝对腐殖酸的去除效果明显好于其它几种混凝剂, 而当混凝剂投量 $> 40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 三氯化铁的混凝效果最佳。如当混凝剂投量为 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 硫酸铝混凝后水样的 TOC 为 $2.43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而三氯化铁、聚合铝和聚合铁处理水样的 TOC 分别为 3.52 、 4.41 和 $9.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。当混凝剂投量为 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 三氯化铁混凝处理水样的 TOC 为 $1.31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而硫酸铝、聚合铝和聚合铁处理水样的 TOC 分别为 2.13 、 3.44 和 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

图 2 为强化混凝对富里酸的去除效果。从中可以看出, 4 种混凝剂对富里酸的去除情况与腐殖酸的去除情况基本一致。对比图 2 与图 1 发现, 4 种混凝剂对腐殖酸的去除效果要高于富里酸, 在相同的混凝剂投量下, 单体的金属盐对有机物的去除效果要优于聚合态的金属盐, 铁盐对富里酸的去除效果要明显好于铝盐。如在混凝剂投量为 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 三氯化铁、硫酸铝、聚合氯化铁和聚合氯化铝混凝后水样中富里酸的浓度分别为 3.22 、 4.34 、 5.85 和 $4.86 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 硫酸铝对腐殖酸和富里酸的去除率分别为 78.9% 和 57% , 三氯化铁对腐殖酸和富里酸的去除率可达 88.2% 和 68.3% 。出现以上现象主要是由于金属阳离子可更有效地与 NOM 键联降低 NOM 的溶解度, 并且单体金属盐的逐级水解产物对 NOM 的吸附能力高于单独某一种水解产物的吸附能力, 从而使其对 NOM 的去除效果高于聚合态的金属盐。富里酸较腐殖酸具有更高的负电性, 要达到相同的去除效果, 需较高的混凝剂投量来中和负电。而由于铁盐的酸化能力强, 会增加腐殖酸和富里酸的质子化程度, 增加混凝剂水解产物上的正电荷密度, 且相近剂量的铁盐水解产生的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 量是铝盐水解产物 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 量的 2.8 倍, 因而在相同混凝

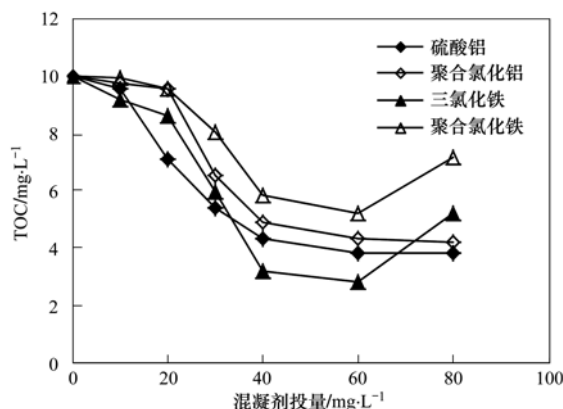


图 2 4 种混凝剂对富里酸的去除情况

Fig. 2 Effect of four coagulants on fulvic acid removal

剂投量下处理效果优于铝盐^[9].

2.2 pH 对腐殖酸和富里酸去除效果的影响

因单体的铝盐和铁盐对腐殖酸和富里酸的去除效果高于其聚合形态,以下均以单体混凝剂作为研究对象.图3是pH为4~9时三氯化铁和硫酸铝混凝对腐殖酸和富里酸去除情况.处理后水的TOC随着pH的升高先逐渐降低后又逐渐升高,在pH为5~7时降至最低.在不同pH范围内,三氯化铁对TOC的去除效果始终好于硫酸铝的去除效果,如pH为7时,三氯化铁和硫酸铝处理后腐殖酸和富里酸的质量浓度分别为1.31、2.82 mg·L⁻¹和1.94、3.82 mg·L⁻¹.而在达到相同去除效果时,三氯化铁比硫酸铝具有更广的pH范围,如当腐殖酸从10 mg·L⁻¹降至4 mg·L⁻¹时,三氯化铁所需pH范围为4.3~7.9,而硫酸铝pH范围为5.0~7.1,与文献[10~12]的研究结论一致.

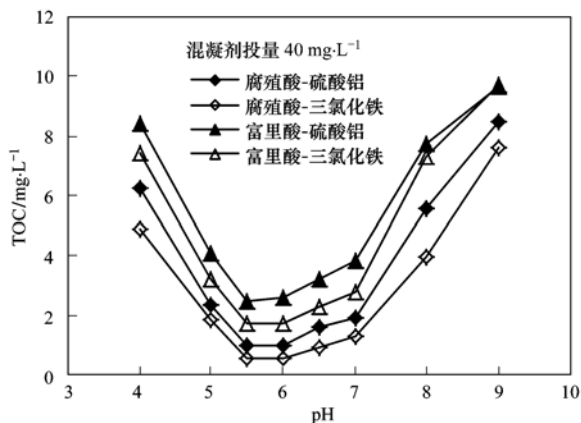


图3 pH值对腐殖酸和富里酸去除的影响

Fig. 3 Effect of pH on humic acid and fulvic acid removal

2.3 腐殖酸和富里酸浓度的影响

图4是在混凝剂投量为40 mg·L⁻¹情况时,水

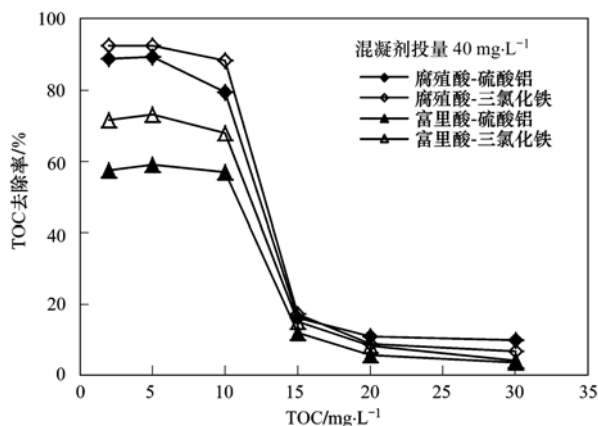


图4 有机物浓度对去除效果的影响

Fig. 4 Effect of organic matter concentration on its removal

中腐殖酸和富里酸浓度对混凝效果的影响.从中可以看出,有机物浓度<10 mg·L⁻¹时对混凝效果影响较小,而当TOC超过15 mg·L⁻¹后,混凝效果明显变差.如当有机物浓度为升高到15 mg·L⁻¹时,硫酸铝对腐殖酸和富里酸的去除率由78.9%和57%分别降至15.4%和12.3%.这是由于随着有机物浓度的提高,水中总电荷数也相应提高,需要更多的混凝剂来中和,在混凝剂投量一定的情况下,单位有机物所分得的电荷数减少,因而其去除效果变差^[13].

图5是TOC总量为10 mg·L⁻¹时,腐殖酸和富里酸相对含量不同时对混凝效果的影响,可以看出2种有机物的相对含量对混凝效果具有非常明显的影响,在富里酸/腐殖酸<0.4时,混凝对有机物的去除效果变化较小;而当富里酸/腐殖酸>0.4后,混凝对有机物的去除效果明显变差.如当富里酸/腐殖酸由0.4提高到0.6时,三氯化铁和硫酸铝对有机物的去除率分别由原来的88%和79%降低至77.5%和64.8%.当水中腐殖酸相对含量较高时,混凝对有机物的去除效果相对较好,而当富里酸的含量相对较高时,去除效果就较差.因而应该根据水体的具体有机物特性来选择合适的混凝剂以取得更好的处理效果.

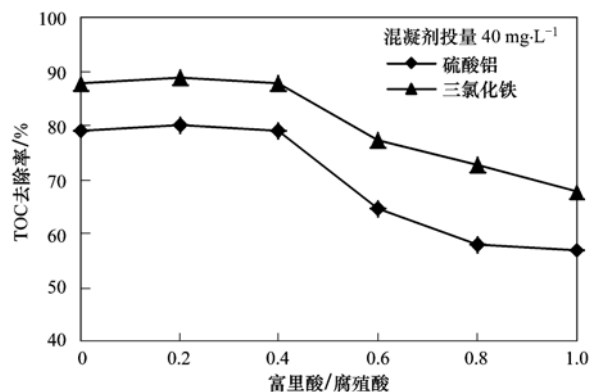


图5 不同有机物含量对去除效果的影响

Fig. 5 Effect of humic acid to fulvic acid ratio on its removal

2.4 浊度对腐殖酸和富里酸去除效果的影响

图6是浊度对腐殖酸和富里酸去除的影响.加入浊度物质后,混凝过程表现出絮体颗粒较大且密实,絮体沉速较快,并且随着浊度的增加,絮体成长速度也较快.但增加浊度并不能提高混凝对水中有机物的去除,即使浊度提高到200 NTU,对有机物的去除效率与未投加浊度时基本相同,说明浊度对有机物的去除效率基本不会造成影响,在有机物存在的情况下,决定混凝剂最佳投量和混凝效果的因素是有机物而非浊度物质.因此在有机物含量较高而浊度较低的水

中,通过投加浊度物质来实现对有机物去除目的的做法并不能真正实现对有机物去除的提高^[14].

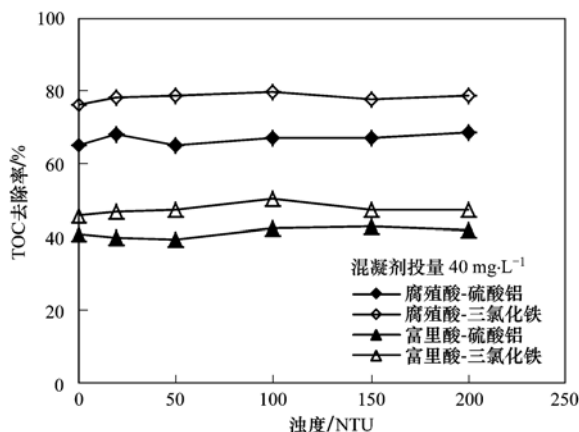


图6 浊度对去除效果的影响

Fig. 6 Effect of turbidity on humic acid and fulvic acid removal

2.5 Ca^{2+} 对腐殖酸和富里酸去除效果影响

图7是 $\rho(\text{Ca}^{2+})$ 对腐殖酸和富里酸去除效果影响.随着 Ca^{2+} 质量浓度的增加,混凝对有机物的去除作用逐渐增强,当 $\rho(\text{Ca}^{2+})$ 增加到 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,对有机物的去除的增强作用较缓. Ca^{2+} 的加入对腐殖酸及富里酸的去除作用较为明显,如 $\rho(\text{Ca}^{2+})$ 为0时,硫酸铝和三氯化铁对腐殖酸和富里酸混凝后的TOC分别为 2.13 、 1.31 、 4.29 和 $3.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而加入 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Ca}^{2+}$ 后,TOC为 0.83 、 0.49 、 2.4 和 $1.46\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.从图7还可以看出,水中的 Ca^{2+} 对腐殖酸的强化作用较强,而对于富里酸混凝的强化作用相对较弱.这可能是由于腐殖酸和富里酸表面所带的官能团的不同而导致与 Ca^{2+} 的络合能力不同的缘故. Ca^{2+} 本身没有絮凝作用,但它的投加有助于颗粒脱稳,增强混凝剂的絮凝特性.其主要通过压缩双电层降低 ξ 电位及与腐殖酸和富里酸络合降低溶

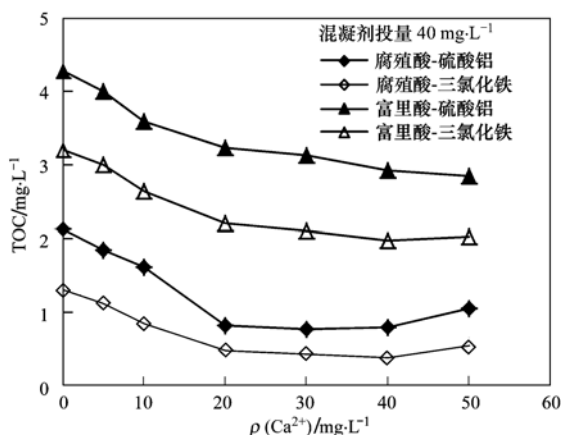


图7 Ca^{2+} 对 TOC 去除效果的影响

Fig. 7 Effect of Ca^{2+} concentration on TOC removal

解度、电离度、可吸附性及相对分子质量分布从而提高其去除效果^[15].

3 结论

(1) 在较低混凝剂投量下,硫酸铝对有机物的去除效果较好,而在投量较高时,三氯化铁的效果要好于其它几种混凝剂,特别是在去除富里酸水样时,三氯化铁表现出更好的去除效果.

(2) 原水的 pH 值对混凝处理有明显的影响,铁盐混凝的最佳 pH 值范围较铝盐要宽.

(3) 原水中腐殖酸和富里酸的相对含量对混凝处理效果有影响,当水中的腐殖酸含量较高时,混凝效果较好,而富里酸含量较高时处理效果较差.

(4) 浊度对有机物的去除基本没有影响,而 Ca^{2+} 的存在可以提高混凝过程对水中天然有机物的去除效果.

参考文献:

- [1] 崔福义, 李圭白. 流动电流法混凝控制技术[J]. 中国给水排水, 1991, 7(6): 36-40.
- [2] Van Benschoten J E, Edzwald J K. Chemical aspects of coagulation using aluminum salts II: coagulation of fulvic acid and polyaluminum Chloride [J]. Water Research, 1990, 24 (12): 1527-1535.
- [3] Coro E, Laha S. Color removal in groundwater through the enhanced softening process[J]. Water Research, 2001, 35(7): 1851-1854.
- [4] Wu C D, Xu X J, Liang J L, et al. Enhanced coagulation for treating slightly polluted algae-containing surface water combining polyaluminum chloride (PAC) with diatomite[J]. Desalination, 2011, 279(1-3): 140-145.
- [5] 刘国平. 混凝和活性炭吸附配合去除水中有机物[J]. 水处理技术, 1988, 14(2): 111-114.
- [6] Nowack K O, Cannon F S, Arova H. Ferric chloride plus GAC for removing TOC [J]. American Water Works Association Journal, 1999, 91(2): 65-78.
- [7] Stephenson R J, Duff S J B. Coagulation and precipitation of a mechanical, pulping effluent-I. removal of carbon, color and turbidity[J]. Water Research, 1996, 30(4): 781-792.
- [8] 黄廷林. 强化絮凝法去除水中 DBP 先质研究[J]. 环境科学学报, 1999, 19(4): 399-404.
- [9] Liu H J, Liu R P, Tian C, et al. Removal of natural organic matter for controlling disinfection by-products formation by enhanced coagulation: a case study [J]. Separation and Purification Technology, 2012, 84: 41-45.
- [10] Pontius F W. Complying with future water regulations [J]. American Water Works Association Journal, 1999, 91(3): 46-58.
- [11] Vrijenhoek E M, Childress A E, Elimelech M, et al. Removing

- particles and THM precursors by enhanced coagulation [J]. American Water Works Association Journal, 1998, **90**(4): 139-150.
- [12] Crozes G, White P, Marshall M. Enhanced coagulation: its effect on NOM removal and chemical costs[J]. American Water Works Association Journal, 1995, **87**(1): 78-89.
- [13] Jacangelo J G, Demarco J, Douglas M O, *et al.* Selected processes for removing NOM: an overview[J]. American Water Works Association Journal, 1995, **87**(1): 64-77.
- [14] 马军, 陈忠林, 李圭白, 等. 高锰酸盐复合药剂助凝处理高稳定性地表水[J]. 中国给水排水, 1999, **15**(9): 1-3.
- [15] Yan M Q, Wang D S, Yu J F, *et al.* Enhanced coagulation with polyaluminum chlorides: role of pH/alkalinity and speciation [J]. Chemosphere, 2008, **71**(9): 1665-1673.

《环境科学》编辑部关于启用编辑信息管理系统公告

《环境科学》编辑部已经开通本刊网站并启用编辑信息管理系统(网站地址:<http://www.hjkx.ac.cn>)。该系统能实现在线投稿、在线审稿、期刊浏览检索等功能,欢迎广大作者、读者和审稿专家使用。目前我刊所有来稿都通过网站编辑信息管理系统进行。作者使用编辑信息管理系统投稿时请先进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面上给出的提示投稿即可。如果您在使用过程中有问题,请及时与我刊编辑部联系。

邮政地址:北京市海淀区双清路18号《环境科学》编辑部

邮 编:100085

电 话:010-62941102,010-62849343

传 真:010-62849343

E-mail:hjkx@rcees.ac.cn

网 址:www.hjkx.ac.cn

CONTENTS

Levels and Sources of Gaseous Polybrominated Diphenyl Ethers in Air over the Northern South China Sea	LI Qi-lu, LI Jun, LIU Xiang, <i>et al.</i> (2533)
Observation and Analysis of Air Pollution in Zhangjiakou, Hebei	SHAO Ping, WANG Li-li, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (2538)
Smog Chamber Simulation of Ozone Formation from Atmospheric Photooxidation of Propane	HUANG Li-hua, MO Chuang-rong, XU Yong-fu, <i>et al.</i> (2551)
Mechanism and Performance of a Membrane Bioreactor for Treatment of Toluene Vapors	YE Qi-hong, WEI Zai-shan, XIAO Pan, <i>et al.</i> (2558)
Analysis of Odor Pollutants in Kitchen Waste Composting	ZHANG Hong-yu, ZOU Ke-hua, YANG Jin-bing, <i>et al.</i> (2563)
Spatial Changes and Sources of Nitrate in Beijing Urban Ecosystem Surface Water	XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2569)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from Three Tributaries of Yangtze River in Different Periods	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2574)
Distribution Characteristics and Potential Risks of Phenols in the Rainy Season Surface Water from Three Gorges Reservoir	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2580)
Spatial Distribution of Perfluorooctanoic Acids and Perfluorinate Sulphonates in Surface Water of East Lake	CHEN Jing, WANG Lin-ling, ZHU Hu-di, <i>et al.</i> (2586)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Daninghe River and Modaoxi River of Three Gorges Reservoir Areas	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2592)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of the Yangtze River	WANG Lan, WANG Ya-ping, XU Chun-xue, <i>et al.</i> (2599)
Analysis of the Source, Potential Biological Toxicity of Heavy Metals in the Surface Sediments from Shellfish Culture Mudflats of Rudong Country, Jiangsu Province	LI Lei, WANG Yun-long, JIANG Mei, <i>et al.</i> (2607)
Effect of Disturbance Intensity on Phosphorus Release and Its Transformation in the Sediment from Taihu Lake	LI Da-peng, HUANG Yong (2614)
Effects of Intrusions from Three Gorges Reservoir on Nutrient Supply to Xiangxi Bay	ZHANG Yu, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2621)
Influence of Perennial Flooding and Drought on Growth Restoration of <i>Acorus calamus</i> in Water-level-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir	LI Qiang, GAO Xiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i> (2628)
Pollution Load and the First Flush Effect of Phosphorus in Urban Runoff of Wenzhou City	ZHOU Dong, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan (2634)
Output Characteristics of Rainfall Runoff Phosphorus Pollution from a Typical Small Watershed in Yimeng Mountainous Area	YU Xing-xiu, LI Zhen-wei, LIU Qian-jin, <i>et al.</i> (2644)
Influence of Land Use Structure on Nitrogen Output in the Watershed of Suburban Agriculture Regions	YANG Feng, WANG Peng-ju, YANG Shan-shan, <i>et al.</i> (2652)
Simulation of Nitrogen and Phosphorus Loss in Siling Reservoir Watershed with AnnAGNPS	BIAN Jin-yun, WANG Fei-er, YANG Jia, <i>et al.</i> (2659)
GIS and L-THIA Based Analysis on Variations of Non-point Pollution in the Guanlan River Watershed, Shenzhen	BAI Feng-jiao, LI Tian-hong (2667)
Response of Sloping Water Erosion to Rainfall and Micro-earth Pattern in the Loess Hilly Area	WEI Wei, JIA Fu-yan, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (2674)
Comparison Study of Enhanced Coagulation on Humic Acid and Fulvic Acid Removal	ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji, YE He-xiu, <i>et al.</i> (2680)
Real-time PCR Detection and Quantification of Emerging Waterborne Pathogens (EWPs) and Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in the Downstream Area of Jiulong River	WANG Qing, LIN Hui-rong, ZHANG Shu-ting, <i>et al.</i> (2685)
Quantitative and Qualitative Analysis of Total Bacteria and Ammonia-oxidizing Bacteria in Buji River in Wet Season	SUN Hai-mei, BAI Jiao-jiao, SUN Wei-ling, <i>et al.</i> (2691)
Study on the Nitrogen Removal Performance and the Characteristics of Denitrification Bacterial Community Structure of Biological Aerated Filter	PENG Xiao-lan, LIU Cong, CHEN Li-jun (2701)
Analysis of Microbial Community Structure at Full-scale Wastewater Treatment Plants by Oxidation Ditch	GUO Yun, YANG Dian-hai, LU Wen-jian (2709)
Performance and Microbial Community Dynamic Characteristics of an Internal Circulation Reactor Treating Brewery Wastewater	ZHU Wen-xiu, HUANG Zhen-xing, REN Hong-yan, <i>et al.</i> (2715)
Coupling AFM Fluid Imaging with Micro-Flocculation Filtration Process for the Technological Optimization	ZHENG Bei, GE Xiao-peng, YU Zhi-yong, <i>et al.</i> (2723)
Study on Removal Effect of Different Organic Fractions from Bio-treated Effluent of Dye Wastewater by UV/H ₂ O ₂ Process	LI Xin, LIU Yong-di, SUN Xian-bo, <i>et al.</i> (2728)
Optimization of <i>Chlorella pyrenoidosa</i> -15 Photoheterotrophic Culture and Its Use in Wastewater Treatment	WANG Xiu-jin, LI Zhao-sheng, XING Guan-lan, <i>et al.</i> (2735)
Characteristics and Mechanism of 2,4,6-TCP Degradation by the "Fe ⁰ /Enriched-Bacteria" System	DAI You-zhi, GUO Li-li, SHI Lei, <i>et al.</i> (2741)
Immobilization of Crude Laccase onto Anion Exchange Resin and Its Application in Decoloration of Malachite Green	QI Xu-liang, LIU Xiang, LIU Bo, <i>et al.</i> (2747)
Low-Temperature Preparation of TiO ₂ /PS/Fe ₃ O ₄ and Its Photocatalytic Activity and Magnetic Recovery	WANG Xue-jiao, REN Xue-chang, NIAN Juan-ni, <i>et al.</i> (2752)
Study on Catalytic Oxidation of Benzene by Microwave Heating	ZHANG Yu-cai, BO Long-li, WANG Xiao-hui, <i>et al.</i> (2759)
Synergistic Effects of Nano-sized Magnetic Particles and Uncoupler to the Characteristics of Activated Sludge	GAO Li-ying, TANG Bing, LIANG Ling-yan, <i>et al.</i> (2766)
Experimental and Modeling Research on the Settlement of Aerobic Granular Sludge	SU Kui-zu, DENG Xiu-kun, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2773)
Analysis of Hydrolytic Enzyme Activities on Sludge Aerobic/Anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment	YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2780)
Effect of Microbial Nutrient Concentration on Improvement of Municipal Sewage Sludge Dewaterability Through Bioleaching	SONG Yong-wei, LIU Fen-wu, ZHOU Li-xiang (2786)
Response of the Artificial Cyanobacterial Crusts to Low Temperature and Light Stress and the Micro-structure Changes Under Laboratory Conditions	RAO Ben-qiang, LI Hua, XIONG Ying, <i>et al.</i> (2793)
Seasonal Dynamics of Soil Active Carbon Pool in a Purple Paddy Soil in Southwest China	WU Yan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2804)
Pollution Characteristics and Accumulation of Antibiotics in Typical Protected Vegetable Soils	YIN Chun-yan, LUO Yong-ming, TENG Ying, <i>et al.</i> (2810)
Transformation and Influences of Copper and Selenium Fractions on Heavy Metals Bioavailability in Co-contaminated Soil	HU Bin, LIANG Dong-li, ZHAO Wen-long, <i>et al.</i> (2817)
Response of Soil Microbial Community to the Bioremediation of Soil Contaminated with PAHs	ZHANG, Jing, LIN Xian-gui, LIU Wei-wei, <i>et al.</i> (2825)
Bioremediation of PAHs Contaminated Soil from Beijing Coking Plant by <i>Lasiodiplodia theobromae</i>	ZHANG Zhi-yuan, WANG Cui-ping, LIU Hai-bin, <i>et al.</i> (2832)
Leaching Experiments on the Release of Trace Elements from Tailings of Chashan Antimony Mine, Guangxi, China	CAI Yong-bing, LI Ling, WEI Xiao-fei, <i>et al.</i> (2840)
Accumulation Characteristics of Arsenic in Suburban Soils of Beijing	QI Jie, WANG Mei-e, WANG Zi-qiang, <i>et al.</i> (2849)
Antioxidant Enzyme Gene Expression as Molecular Biomarkers of Exposure to Polycyclic Musks	CHEN Chun, ZHOU Qi-xing, LIU Xiao-wei (2855)
Effects of Ozone Pollution on the Accumulation and Distribution of Dry Matter and Biomass Carbon of Different Varieties of Wheat	KOU Tai-ji, YU Wei-wei, ZHU Jian-guo, <i>et al.</i> (2862)
Influence of Reaction Time of Urea Hydrolysis-Based Co-precipitation on the Structure of ZnAl Layered Double Hydroxides and the Phosphate Adsorption	LU Ying, CHENG Xiang, XING Bo, <i>et al.</i> (2868)
Competitive Adsorption Kinetics of Aqueous Pb ²⁺ and Cu ²⁺ on Nano-HAP Surfaces	HU Tian-tian, CANG Long, WANG Yu-jun, <i>et al.</i> (2875)
Effects of pH and Ni ²⁺ on Sorption Behavior of Phenanthrene on Engineered Nano-Silica	LUO Pei, SUN Hong-wen, ZHANG Peng (2882)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Uranium on Attapulgite	LIU Juan, CHEN Di-yun, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2889)
Adsorption Characteristics of Ciprofloxacin in Ustic Cambosols	CUI Hao, WANG Shu-ping (2895)
Kinetic Mechanism and Characteristics Researches for Hydrazine-based NO _x Removal at Moderate to High Temperatures	HONG Liu, CHEN De-zhen, WANG Du, <i>et al.</i> (2901)
Current Research Situation of H ₂ S Selective Catalytic Oxidation Technologies and Catalysts	HAO Zheng-ping, DOU Guang-yu, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (2909)

《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)

2012年8月15日 33卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 8 Aug. 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行