



不同碱化度钛铁复合药剂微絮凝强化过滤性能研究

张克峰¹, 岳浩伟¹, 王 珊¹, 李佳岷², 陈仪霖¹, 刘金虎¹, 马春晓¹

(1. 山东建筑大学市政与环境工程学院, 山东济南 250101;

2. 山东省建筑设计研究院有限公司, 山东济南 250001)

[摘要] 为探究新型钛铁复合药剂的微絮凝强化过滤性能,通过微絮凝滤柱模拟试验制备了聚合硫酸钛(PTS)、碱化度分别为 0.5、0.75、1.0 的钛铁复合药剂(PTFC),考察出水浊度、颗粒数、溶解性有机物、过滤周期等指标,对比分析不同药剂的助滤效能;结合有机物荧光特性、亲疏水性有机物去除情况,探究有机物去除机制。结果表明,紫外可见光谱及傅里叶红外光谱表征发现 PTFC 中 Fe 和 Ti 产生了多种高聚态化合物,PTFCb0.75 助滤剂对浊度、颗粒数、溶解性有机物等显示出高效的去除效果;通过 LO-COD 检测说明了 PTFC 能够很好地降解大分子有机物,吸附小分子有机物。

[关键词] 钛盐;钛铁复合;碱化度;微絮凝过滤

[中图分类号] X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)09-0160-07

Microfloculation enhanced filtration performance of ferrotitanium composite reagent with different alkalinity

ZHANG Kefeng¹, YUE Haowei¹, WANG Shan¹, LI Jiamin², CHEN Yilin¹, LIU Jinhu¹, MA Chunxiao¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Ji'nan 250101, China;

2. Shandong Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Ji'nan 250001, China)

Abstract: To explore new ferrotitanium composite reagents micro flocculation strengthening filtration performance influence, polymeric titanium sulfate (PTS), basicity were 0.5, 0.75, 1.0, ferrotitanium composite reagent (PTFC) were prepared through micro flocculation filter column simulation experiment. The water turbidity, the number of particles, the soluble organic matters, and filtration cycle index were examined and the different reagents leaching efficiency were analyzed. Combined with the fluorescence characteristics of organic matter and the removal of hydrophilic and hydrophobic organic matter, the removal mechanism of organic matter was explored. The results showed that several high polymeric compounds were produced in Fe and Ti of PTFC under characterization by UV-Vis and FT-IR spectroscopy. The PTFCb0.75 filter aid showed high removal efficiency on turbidity, particle number and dissolved organic matter. The LO-COD test showed that PTFC could degrade macromolecule organic matter and adsorb small molecule organic matter well.

Key words: titanium salt; ferrotitanium composite; basicity; microfloculation filtration

混凝在去除胶体、有机物和无机离子方面发挥着重要作用^[1],但由于混凝剂投加量较大,造成的二次污染较为严重,微絮凝强化过滤应运而生。微絮凝强化过滤工艺在滤池前投加絮凝剂,利用滤柱内形成的微涡旋,在滤柱内同时实现絮凝、沉淀和截留过程,是一种直接过滤的形式,省去了传统混凝工艺所需的反应池和沉淀池^[2],因此是一种效率极高的集成

工艺。常用的絮凝剂中就包括铁盐,它在去除各种杂质方面表现出良好的性能,但关于铁盐出水存在的颜色问题一直存在争议^[3]。因此,研发一种高效且对环境无二次污染的絮凝剂成为当下探究的重点。

钛作为一种新型的水处理药剂原料,很快就成为了大众关注的焦点。据世界卫生组织报道,钛及其化合物的毒性非常小,他们极少包括在任何水质准则中^[4]。

[基金项目] 山东建筑大学博士科研基金(X20037Z);“十三五”国家科技重大水专项:城镇供水系统关键材料设备评估验证及标准化(2017ZX07501-003);山东省住房和城乡建设厅研究开发项目(2020kykf04-011)

但由于钛价格昂贵,研发成本较高,所以本研究将钛盐与铁盐进行复合来降低制药成本,除此之外,钛铁复合药剂还具有以下优点:(1)钛在酸性条件下呈 $[\text{Ti}(\text{H}_2\text{O})_6]^{4+}$ 或水解为 $(\text{TiO})^{2+}$,并且铁也会存在大量 $(\text{FeOH})^{2+}$ 和 $[\text{Fe}_2(\text{OH})_2]^{4+}$,可以起到更好的絮凝、助滤效果;(2)大大降低铁盐产生的二次污染,有效规避了铁盐出水色度的问题^[5]。本研究研制了不同碱基度的钛铁复合药剂,探讨了耦合微絮凝强化过滤流程对饮用水源水的处理效果,通过投加藻液与腐殖酸模拟微污染水体,对浊度、溶解性有机物、过滤周期进行研究,对比了聚合硫酸钛(PTS)与铁钛复合药剂(PTFC)的净化性能。

1 材料与仪器

1.1 试验材料

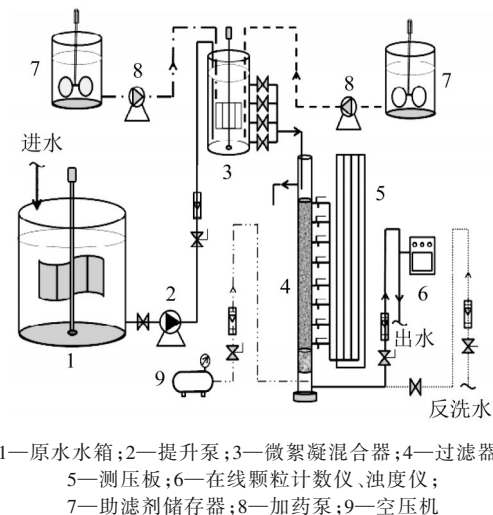
硫酸钛、次氯酸钠,上海麦克林生化科技有限公司;无水三氯化铁,国药集团化学试剂有限公司;氢氧化钠,天津市大茂化学试剂厂;浓盐酸,信阳市化学试剂厂;腐殖酸,上海阿拉丁生化科技股份有限公司,以上试剂均为分析纯。

1.2 试验仪器

2100Q型便携式浊度仪,美国哈希有限公司;TOC型总有机碳分析仪,德国元素公司;荧光光谱仪,上海天美有限公司;液相色谱-有机碳联用仪,DOC-Labor公司;傅里叶红外光谱分析仪、紫外-可见分光光度计,赛默飞世尔科技有限公司。

1.3 试验装置

本研究所用试验装置及工艺流程见图1。



1—原水水箱;2—提升泵;3—微絮凝混合器;4—过滤器;
5—测压板;6—在线颗粒计数仪、浊度仪;
7—助滤剂储存器;8—加药泵;9—空压机

图1 微絮凝强化过滤实验示意

Fig. 1 Schematic diagram of microflocculation enhanced filtration experiment

试验设计流量为20 L/h(试验滤速为7 m/h)。中试装置沉淀池的出水作为原水,由提升泵加压后流入微絮凝混合器。混合器的总有效容积为1.2 L(微絮凝时间为2 min)。通过蠕动泵将一定浓度的助滤剂加入微絮凝混合器中,与原水充分混合进行微絮凝,然后从右出口流出的出水自上而下流经砂过滤层和支撑层。当砂滤出水浊度超过0.5 NTU或水头损失超过0.7 m时停止过滤,用自来水和压缩空气同时对滤料进行气水反冲洗,滤料膨胀率控制在40%~50%左右,气水反冲洗方法为先用空气冲洗2 min,然后用空气和水同时冲洗5 min,最后用水冲洗6 min。该装置由有机玻璃制成,滤柱高1.9 m(底水分布区高度0.1 m),内径6 cm。从下到上每隔15 cm有8个测压计,测压管与标尺连接,过滤前后的水压差为沿过滤器的水头损失。

1.4 试验原水

试验原水采用济南市鹊山水厂沉淀池出水,试验于2021年10—12月份进行,原水温度20~25℃。其他具体指标见表1。

表1 鹊山水厂中试基地原水常规指标					
Table 1 Raw water routine index of Pilot-scale base of Guihua water plant					
指标	pH	浊度/ NTU	UV ₂₅₄ /cm ⁻¹	COD _{Mn} / (mg·L ⁻¹)	DOC/ (mg·L ⁻¹)
数值	8.21~8.5	1.81~5.94	0.059~0.078	2.287~2.944	2.031~2.997

试验中不同复合药剂投加量控制在4 mg/L,试验水体pH控制在7.5~8.0之间,原水投加藻液与腐殖酸类大分子有机物模拟微污染水体。

2 试验方法

2.1 不同碱化度PTFC制备

首先,称取一定质量的无水三氯化铁粉末缓慢加入至500 mL去离子水中,以800 r/min快速搅拌1 h,制备成一定浓度的氯化铁溶液。之后,按照物质的量比1:1称取一定质量的硫酸钛固体,缓慢加入氯化铁溶液中,水浴搅拌2 h,使其完全溶解,加入去离子水至容量瓶中,使其定容至1 L。

制备1 mol/L的NaOH溶液,将制备的复合溶液取出3份,分别为100 mL,使用慢碱滴定法分别滴加定量氢氧化钠溶液,滴加时间为15~30 min,滴加完毕后继续搅拌2 h,得到碱化度分别为0.50、0.75、1.00的PTFC溶液,制备的溶液分别以PTFCb0.50、PTFCb0.75、

PTFCb1.00表示,PTS制备方法 与PTFC相同。

2.2 藻种培养

藻种购于中科院武汉水生生物研究所,藻种利用BG11培养基扩大培养。接种前培养基用纯水冲洗干净,利用高压真空灭菌器进行高温灭菌。接种藻类细胞后,在25℃人工气候培养箱中培养。光照条件为2 000 lx,光暗比为12 h/12 h。光照期间,每隔4 h手动摇晃锥形瓶。

2.3 检测方法

2.3.1 常规指标检测方法

pH采用Mettler Toledo pH测试仪(瑞士梅特勒托利多)测定;TOC采用TOC型总有机碳分析仪(德国元素公司)测定;浊度采用2100Q型便携式浊度仪(美国哈希有限公司)测定;三维荧光分析采用F-2700型日立荧光分光光度计。

2.3.2 紫外可见光谱与傅里叶红外光谱分析

利用紫外-可见分光光度计进行光谱分析,将PTS与不同碱化度PTFC稀释后的溶液倒入1 cm比色皿中,在190~900 nm之间进行全波长扫描,仪器狭缝为1 nm;本试验对PTS与不同碱基度PTFC进行傅里叶红外光谱图测试,对400~4 000 cm⁻¹波数范围内的红外光谱特征峰与相应已知的化学键特征峰进行匹配。

2.3.3 液相色谱-有机碳测定仪(LC-OCD)检测

通过不同尺寸排阻色谱将有机物按照分子质量进行分离,然后测定各组分的OCD、UVD和OND,最后进行汇总分析,将水中的有机物分为生物聚合物(Bio-polymers)、腐殖酸(Humic)、腐殖酸降解产物(Building Blocks)、低分子酸性有机物(Acids and LMW-humics)和低分子中性有机物(LMW-neutrals),此外还将有机碳细分为TOC、DOC、疏水有机碳(HOC)、亲水有机碳(CDOC)和颗粒有机碳(POC)。本研究中LC-OCD的检测条件:进样体积1 000 μL,每个样品总运行时间为70 min,使用特定软件对试验结果进行峰积分分析。

3 结果与讨论

3.1 紫外可见光谱的表征

在波长为190~900 nm之间进行全波长扫描,由于钛离子与铁离子荷径比较大,因此在稀释时较易水解成铁、钛为主的络合物^[6]。PTFC紫外/可见吸收光谱见图2。

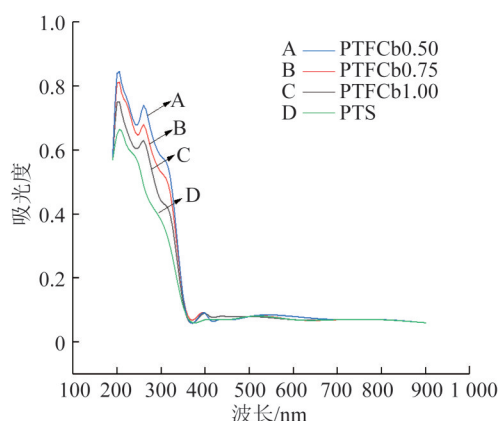


图2 PTFC紫外/可见吸收光谱

Fig. 2 UV/Visible absorption spectra of PTFC

由图2可知,PTS中Ti极易生成偏钛TiO(OH)₄,当水解彻底时会有大部分转换成TiO₂颗粒物。PTFC在低碱化度情况下,紫外可见吸收光谱吸收峰强度较强,主要是Ti⁴⁺和Fe³⁺较多的原因。单聚体的Fe吸收峰主要在300 nm以下,在200~230 nm处主要为(FeOH)²⁺吸收峰,在240 nm处主要以Fe³⁺吸收峰为主。在吸收波长大于300 nm时主要是Fe高聚物的吸收峰。在300~400 nm处出现中聚体Fe的吸收峰,主要以[Fe₃(OH)₄]⁵⁺、[Fe₅(OH)₉]⁶⁺为主,也有少量[Fe₆(OH)₁₂]⁶⁺、[Fe₇(OH)₁₂]⁹⁺的存在^[7]。在400 nm附近出现的特征峰可能与羟基桥联的Fe、Ti聚合物有关,同时200~240 nm处由于钛离子对比铁离子对碱化剂和水中—OH的竞争作用更强,出现与以偏钛有关的宽吸收带^[8]。

总体来说,PTFC比PTS在190~350 nm处对紫外光具有更强的吸收,在190~220 nm处有较强的吸收峰,说明钛铁离子之间发生了化学聚合,形成了高分子聚合物,提高了微絮凝过滤效果。

3.2 傅里叶红外光谱表征

对不同碱化度PTFC和PTS进行红外扫描分析,结果见图3。

由图3可知,4种药剂在波数分别为640、738 cm⁻¹附近均产生Ti—O、Ti—O—Ti等吸收峰,随着碱化度的增大,吸收峰呈现升高趋势。在波数分别为3 450、1 635 cm⁻¹附近PTFCb0.50吸收峰强度与吸收峰面积明显低于PTFCb0.75、PTFCb1.00,这是由于在低碱化度下,与Fe、Ti离子螯合的游离羟基—OH、分子间缔合—OH数量减少,所以红外光谱表现为吸收峰强度

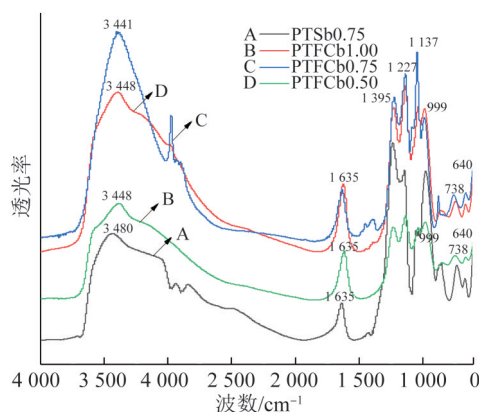


图3 PTFC傅里叶红外光谱

Fig. 3 Fourier infrared spectra of PTFC

降低^[9]。在波数 $1\,137\sim 1\,395\text{ cm}^{-1}$ 之间,PTFCb0.75比PTFCb1.00具有更强的吸收峰,主要是由于Fe离子在过高碱化度下水解生成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 沉淀而失去反应效能,其中 999 cm^{-1} 和 $1\,137\text{ cm}^{-1}$ 吸收峰的存在主要是由 $\text{Fe}-\text{O}-\text{Fe}$ 和 $\text{Fe}-\text{OH}-\text{Fe}$ 引起的弯曲振动^[10]。与PTS不同,PTFCb0.75在波数分别为 $1\,227$ 、 $1\,410\text{ cm}^{-1}$ 产生的强烈波动峰主要是由于生成了 $\text{Ti}-\text{O}-\text{Fe}$ 。相比于钛盐药剂PTS,不同碱基度钛铁复合药剂形成了 $\text{Fe}-\text{O}-\text{Fe}$ 、 $\text{Ti}-\text{O}-\text{Fe}$ 等聚合物,这类物质对于水中胶体的凝聚脱稳有着重要的作用,使得形成的絮体紧实、过滤效果好。

3.3 不同碱化度PTFC对过滤性能的影响

3.3.1 浊度

不同碱化度的PTFC和普通钛盐对浊度的去除效果见图4。

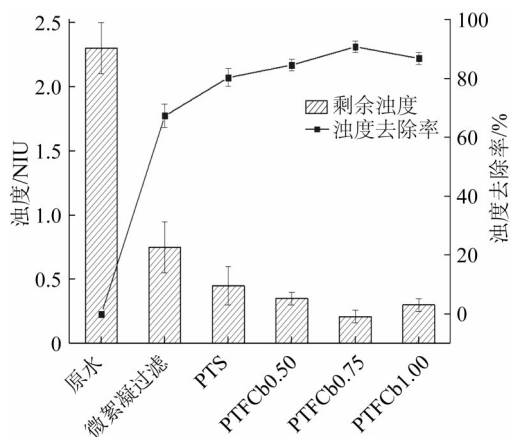


图4 不同碱化度的PTFC和普通钛盐对浊度去除效果

Fig. 4 Turbidity removal effects of PTFC and ordinary titanium salts with different alkalinity

由图4可知,随着碱化度增大,浊度去除率呈现先增大后减小的趋势,不同碱化度PTFC对浊度的去除效果优于PTS。当碱化度为0.5时,砂滤出水浊度为0.35 NTU,浊度去除率为84.7%;当碱化度提升到0.75时处理效果最佳,浊度去除率达到了90.9%,由进水的2.30 NTU下降至砂滤出水的0.21 NTU。其主要原因是随着碱化度的增加,Fe与Ti之间进行大量的缩合反应形成多种聚合物,具有极强的吸附架桥和电中和能力^[11]。结合PTFC紫外可见光谱可知,低碱化度时 Ti^{4+} 和 Fe^{3+} 离子吸收峰较强,而高碱化度PTFC中的 Ti^{4+} 和 Fe^{3+} 形成的高聚物不稳定,极易水解,使得除浊效果反而降低。

3.3.2 溶解性有机物

不同碱化度PTFC对溶解性有机物的去除情况见图5。

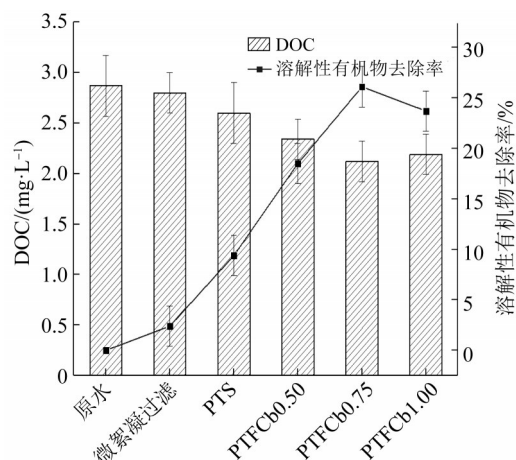


图5 不同碱化度PTFC对溶解性有机物去除情况

Fig. 5 Removal of dissolved organic matter by PTFC with different alkalinity

由图5可知,在投入不同碱化度的PTFC后,水中的溶解性有机物浓度与原水相比显著降低,其去除有机物的能力较PTS有一定程度的提升。原水进水DOC为 2.87 mg/L ,PTS去除率在10%左右,当碱化度提升到0.75时,出水DOC能达到 2.12 mg/L ,最高去除率达到26.1%。其主要是在钛铁助滤剂中加入碱化剂,钛铁与碱化剂中的 $-\text{OH}$ 形成多种化学键,这些化学键对水中有机物的吸附去除具有促进作用。并且实验水体在pH为6~8范围内,对有机物的去除主要以钛离子电中和、铁的氢氧化物和钛铁聚合物的吸附作用为主,相比于钛盐仅以钛离子电中和去除有机物具有更好效果。

3.3.3 颗粒数

不同碱化度 PTFC 对颗粒数的去除情况见图 6。

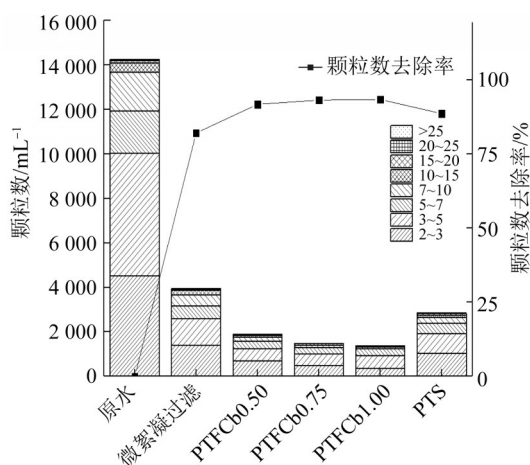


图 6 不同碱化度 PTFC 对颗粒数去除情况

Fig. 6 Particle number removal by PTFC with different alkalinity

由图 6 可知,随着碱化度的增加,水中总颗粒数相应减少,当碱化度为 0.5 时,总颗粒数为 1 436 mL⁻¹,对水中颗粒数去除率达到 85% 以上,碱化度提升到 0.75 时,总颗粒数为 1 120 mL⁻¹,对水中颗粒数去除率达到 92.15%,继续投加更大碱化度助滤剂时,去除颗粒数效果提升并不明显。原水中颗粒物主要集中在 2~3 μm、3~5 μm,占到原水总颗粒数的 70%,投加 PTFC 助滤剂后,对此范围内颗粒数去除率能达到 90% 左右,且水中 >20 μm 颗粒数几乎全部去除。

其中粒径较小的颗粒物容易受到分子间静电引力、布朗作用、范德华力和氢键作用的影响,在投加 PTFC 助滤剂时其水解生成的多羟基桥联的钛铁聚合物,吸附架桥作用强烈,在氢键和范德华力对胶体粒子结合的同时 PTFC 本身含有的钛铁离子水解电中和作用对水中胶体颗粒去除也尤其明显^[12];而 PTS 助滤剂仅仅是钛离子及其聚合物吸附电中和及架桥作用,并且作用较弱,去除效果较差。

3.3.4 过滤周期

不同碱化度的 PTFC 对过滤周期的影响见图 7。

由图 7 可知,增大 PTFC 碱化度会降低二次微絮凝过滤的过滤周期,相比于 PTS,过滤周期缩短了 0.1~0.3 h,其中过滤周期最短为 PTFCb1.00 的 4.64 h。各个过滤周期存在差异,主要是因为随着过滤的进行,水中的胶体颗粒在失稳后不断黏附在滤料表面,

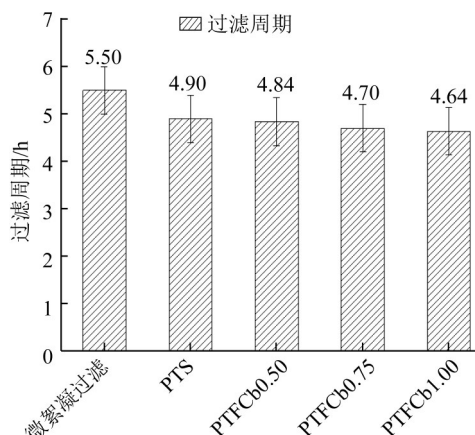


图 7 不同碱化度的 PTFC 对过滤周期影响

Fig. 7 Influence of PTFC with different alkalinity on filtration cycle

当上层滤料的吸附能力达到饱和时,吸附在上层滤料表面的颗粒由于水流的剪切力而脱落,脱落的颗粒继续吸附在滤料的下层^[13]。这就说明不同碱化度助滤剂形成的絮体紧实程度和粒径大小不同,碱化度越大,微絮凝形成的絮体粒径越大,阻截作用越明显,从而缩短了过滤周期。

3.4 AOM 及腐殖质类有机物去除机理分析

3.4.1 三维荧光特性分析

为了进一步探究 PTFC 对 AOM 及腐殖质类有机物去除能力及作用机制,对试验水体进行微絮凝过滤检测其荧光特性。其中助滤剂为 PTFCb0.75、投加量为 4 mg/L、pH 控制在 7.50~8.00 之间、过滤周期为 4.8 h。原水与投加 PTFC 后的三维荧光分析示意图 8。

根据 P. G. COBLE 和 A. BAKER 的研究^[14-15],含氮有机物以蛋白质和氨基酸为主,主要集中在 F1 和络氨酸类蛋白区域;微生物代谢产物主要集中在 F2 区域;含碳有机物主要集中在 F3 和类富里酸区域。由图 8 可知,试验水体中色氨酸类物质和微生物代谢产物较多,腐殖酸区域所包含的荧光区域最强,只有少量富里酸存在。向水中投加 PTFC 后,腐殖酸区域以及微生物降解产物区域都有显著的去除效果,这就说明钛铁复合药剂在其中产生的聚合物能够对大分子有机物有高效的吸附作用,通过微絮凝作用黏附在絮体表面通过滤料截留达到去除的目的。由图 8 还可知,PTFCb0.75 助滤剂微絮凝作用对于色氨酸、富里酸类小分子有机物同样具有一定的去除作用。

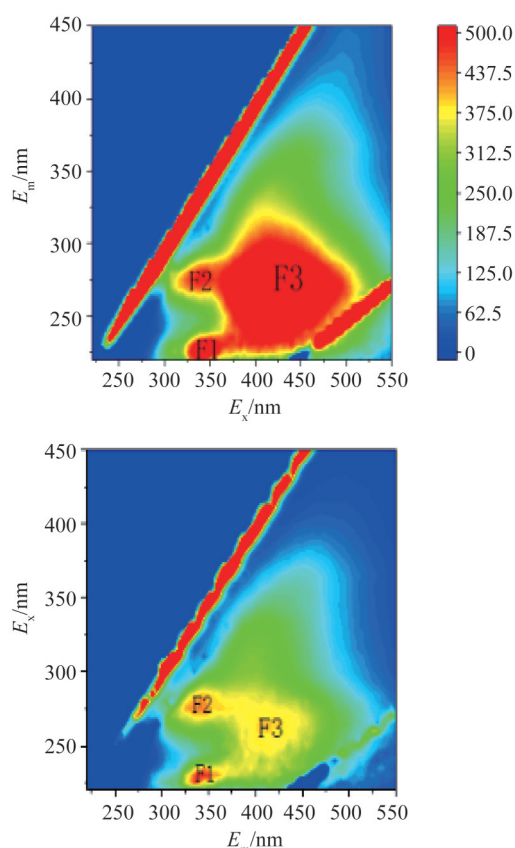


图8 原水与投加PTFC后的三维荧光分析示意

Fig. 8 Schematic diagram of 3D fluorescence analysis after raw water and PTFC injection

3.4.2 微絮凝过滤前后液相色谱-有机碳检测的变化

对模拟水体与PTFCb0.75微絮凝强化过滤出水进行LC-OCD检测,结果见表4。

由表4可知,试验水体AOM中疏水性有机物(HOC)和亲水性有机物(CDOC)分别占比20%和80%,其中生物聚合物、类腐殖酸、腐殖酸降解产物、低分子酸性有机物、低分子中性有机物的质量浓度分别为1.045 mg/L、1.520 mg/L、1.587 mg/L、<1 mg/L、0.608 mg/L,分别占比22%、32%、33%、0%、13%。生物聚合物中蛋白质占比约为68%,其N/C约为0.45;类腐殖酸中DON为0.681 mg/L, N/C约为0.44,略低于生物聚合物;此外, AOM中腐殖酸降解产物(Building Blocks)的占比高达33%,约为实际水体值的3倍,这表明其具有很好的可生化降解性^[17]。

反应后滤前水中投加PTFC的DOC降低了约24.8%,对生物聚合物、类腐殖酸、腐殖酸降解产物、低分子中性有机物的去除率分别为35.7%、48.6%、-9.8%、37.3%,微生物代谢产物蛋白质占比降低至64%,N/C无明显变化。腐殖酸降解产物增多,低分子中性有机物减少,疏水性有机物也有明显去除,说明PTFC所形成的多种聚合物具有吸附大分子有机物和小分子有机物的能力。

表4 LC-OCD分离数据

Table 4 LC-OCD separation table

项目	可溶性 有机物/ (mg·L ⁻¹)	疏水性 有机物/ (mg·L ⁻¹)	亲水性 有机物/ (mg·L ⁻¹)	生物聚 合物/ (mg·L ⁻¹)	DON	N/C	类腐殖酸/ (mg·L ⁻¹)	DON	N/C	腐殖酸降 解产物/ (mg·L ⁻¹)	低分子酸性 有机物/ (mg·L ⁻¹)	低分子中性 有机物/ (mg·L ⁻¹)
试验原水	4.760	0.952	3.808	1.045	440	0.44	1.520	681	0.44	1.587	<1	0.608
投加PTFC	3.578	<1	3.578	0.672	255	0.42	0.782	373	0.45	1.743	<1	0.381

4 结论

(1)红外光谱表明了PTFC具有多种形态的基团,如Fe—OH、Fe—Ti—O、Ti—O等,这表明在制备过程中金属元素与羟基得到了有效的结合;通过紫外可见光谱分析发现,PTFC在190~220 nm处有较强的吸收峰,说明钛铁离子之间发生了化学聚合,形成的高分子聚合物对微絮凝作用具有良好的辅助作用。

(2)在PTS与不同碱化度PTFC中,PTFCb0.75对浊度、颗粒数的去除效果最好,浊度由2.17 NTU降至0.21 NTU,浊度去除率为90.47%,其总颗粒数为

1 120 mL⁻¹,对水中颗粒数的去除率达到92.15%;从两种助滤剂对水中有机物的去除效能来看,向滤前水中投加PTFCb0.75助滤剂对原水有机物的处理效果最好,出水DOC为2.12 mg/L,DOC去除率达到26.1%。

(3)将PTFCb0.75助滤剂加入模拟高藻水和腐殖酸微污染源中,通过三维荧光分析发现,对腐殖酸、微生物代谢产物,这类大分子有机物去除效率高。通过LC-OCD检测发现,投加PTFCb0.75助滤剂后腐殖酸降解产物增多、低分子有机物降低,表明PTFC能够吸附大分子有机物和小分子有机物的能力。

参考文献

- [1] PEYDAYESH M, SUTA T, USUELLI M, et al. Sustainable removal of microplastics and natural organic matter from water by coagulation-flocculation with protein amyloid fibrils[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(13): 8848–8858.
- [2] 徐竟成, 许健, 李光明, 等. 微絮凝-微滤用于印染废水回用反渗透预处理的试验研究[J]. *环境工程学报*, 2007, 1(11): 64–68.
XU Jingcheng, XU Jian, LI Guangming, et al. Research on micro-flocculation and microfiltration for RO pretreatment of dyeing wastewater for reuse[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2007, 1(11): 64–68.
- [3] ZHAO Yanxia, LI Xiaoyan. Polymerized titanium salts for municipal wastewater preliminary treatment followed by further purification via crossflow filtration for water reuse[J]. *Separation and Purification Technology*, 2019, 211: 207–217.
- [4] 桑杰, 张翠玲, 闻明昕, 等. 无机高分子絮凝剂聚硅硫酸钛铁的制备及其絮凝条件的优化研究[J]. *环境科学与管理*, 2019, 44(7): 97–101.
SANG JIE, ZHANG Cuiling, WEN Mingxin, et al. Preparation of inorganic polymer flocculant polysilicon titanium sulfate and optimization of flocculation conditions[J]. *Environmental Science and Management*, 2019, 44(7): 97–101.
- [5] SIROIS M, COUTURIER M, BARBER A, et al. Interactions between iron and organic carbon in a sandy beach subterranean estuary[J]. *Marine Chemistry*, 2018, 202: 86–96.
- [6] 薛文文. 聚硫酸铁钛混凝剂(PFTS)的制备及在饮用水处理中的应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
XUE Wenwen. Preparation of poly ferric titanium sulfate (PFTS) and utilization in drinking water treatment[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [7] 陈伟, 郑怀礼, 翟俊, 等. 聚合硫酸铁钛混凝剂的制备及红外、紫外-可见光谱分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(4): 1038–1043.
CHEN Wei, ZHENG Huaili, ZHAI Jun, et al. Study on the preparation of A new composite coagulant: Poly-ferric-titanium-sulfate and analysis of FTIR spectrum and UV-vis spectrum[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(4): 1038–1043.
- [8] 谢少艾, 陈虹锦, 舒谋海. 元素化学简明教程[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2006: 50–60.
- [9] ZHU Guocheng, ZHENG Huaili, ZHANG Zhi, et al. Characterization and coagulation-flocculation behavior of polymeric aluminum ferric sulfate(PAFS)[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 178: 50–59.
- [10] LAN Wei, QIU Huiqin, ZHANG Jie, et al. Characteristic of a novel composite inorganic polymer coagulant-PFAC prepared by hydrochloric pickle liquor[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 162(1): 174–179.
- [11] 石健, 万杨, 黄鑫, 等. 聚合铁钛混凝剂对印染废水的处理[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(5): 1021–1029.
SHI Jian, WAN Yang, HUANG Xin, et al. Treating dyeing wastewater with a kind of polyferric titanium sulfate[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2019, 13(5): 1021–1029.
- [12] WANG Yonglei, ZHANG Kefeng, ZHANG Yanhao, et al. Notice of retraction: The study on the treatment of low temperature and low turbidity water by the technology of new flofilter[C]// 2011 5th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, Wuhan, 2011: 1–4.
- [13] 王秉钧. 微絮凝直接过滤工艺处理效果的试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
WANG Bingjun. Experimental study on the filtration performance of micro flocculation direct filtration[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [14] COBLE P G. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy[J]. *Marine Chemistry*, 1996, 51(4): 325–346.
- [15] BAKER A. Fluorescence excitation-emission matrix characterization of some sewage-impacted rivers[J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, 35(5): 948–953.
- [16] 杜振齐. UV/H₂O₂/O₃高级氧化技术降解藻源亚硝胺前体物研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2020.
DU Zhenqi. Research on degradation of nitrosamine precursor from algae organic matter by UV/H₂O₂/O₃ advanced oxidation technology[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2020.
- [作者简介] 张克峰(1964—), 教授。电话: 13553195176, E-mail: 14045@sdjzu.edu.cn。通讯作者: 王珊, 硕士生导师。E-mail: 14045@sdjzu.edu.cn, 电话: 18615564408。
- [收稿日期] 2022-07-16(修改稿)