

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性

张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年2月

第42卷 第2期
Vol.42 No.2

目次

2013~2017年中国PM_{2.5}污染防治的健康效益评估 张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 魏煜, 谢刘震(513)

区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估 武文琪, 张凯山(523)

2016年1月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估 姚森, 张晗宇, 王晓琦, 杨书申(534)

广州市2020年春节烟花爆竹燃放对空气质量的影响 裴成磊, 王宇骏, 毕燕茹, 廉秀峰, 周倩妮, 王在华, 马理, 李梅(546)

长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性 夏丽, 朱彬, 王红磊, 康汉青(556)

南京市不同天气过程下颗粒物中水溶性离子分布特征及其来源解析 张杨, 王红磊, 刘安康, 陈魁, 张艺馨, 刘思晗(564)

天津市冬季气溶胶吸湿因子的粒径分布特征 丁净, 张裕芬, 郑乃源, 张会涛, 余卓君, 李立伟, 元洁, 唐森, 冯银厂(574)

输送、滞留叠加海上回流的长时间沙尘天气影响判断及贡献分析 张哲, 乔利平, 周敏, 黄丹丹, 安静宇, 郭会琴, 王红丽, 黄成, 董赵鑫, 王书肖(584)

洛阳市秋冬季PM_{2.5}中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评价 齐静文, 张瑞芹, 姜楠, 李利萍, 苗青青(595)

郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析 王旭东, 尹沙沙, 杨健, 袁明浩, 张瑞芹, 李亚松, 卢轩(604)

基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案 李光耀, 陈强, 郭文凯, 张瑞欣, 夏佳琦(616)

汽车工业区大气挥发性有机物(VOCs)变化特征及来源解析 叶露, 邵菁菁, 俞华明(624)

兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在WRF-Chem中应用评估 郭文凯, 李光耀, 陈冰, 夏佳琦, 张瑞欣, 刘晓, 朱玉凡, 陈强(634)

2010~2017年四川省机动车污染物排放趋势分析 李媛, 石嘉诚, 陈军辉, 潘玉瑾, 周虹辉, 范武波, 叶宏, 钱骏, 刘政(643)

珠江三角洲海陆交互沉积物中镉生物有效性及生态风险评价 王芳婷, 包科, 陈植华, 黄长生, 张彩香, 赵信文, 刘学浩(653)

乌梁素海流域地表水中全氟化合物分布、来源及其生态风险 史锐, 毛若愚, 张梦, 吕永龙, 宋帅, 赵纪新(663)

乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征及其与盐度、叶绿素a的响应关系 王志超, 杨建林, 杨帆, 杨文煊, 李卫平, 李兴(673)

张家口清水河拦沙坝对磷输移、滞留的影响 王维, 李叙勇(681)

三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因 杨凡, 王丽婧, 纪道斌, 李虹, 李莹杰, 李鑫, 许杨, 田盼, 吴雅婷(688)

巢湖沉积物氮磷分布及污染评价 王艳平, 徐伟伟, 韩超, 胡维平(699)

巢湖南淝河口底泥污染特征及疏浚决策 杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 尹洪斌(712)

氧化强化对氢氧化钙原位固磷效果的影响 徐楚天, 李大鹏, 岳薇, 吴宇涵, 孙培荣, 汤尧禹, 黄勇(723)

降雨径流事件对三峡水库香溪河库湾甲烷释放的影响 陈敏, 许浩霆, 王雪竹, 肖尚斌(732)

典型喀斯特河流气-水界面二氧化碳交换特性及其营养调控因素 刘睿, 张静, 陈祖胜, 倪茂飞, 刘文胜(740)

江苏省代表性水源地抗生素及抗性基因赋存现状 王龙飞, 程逸群, 胡晓东, 朱金鑫, 李轶(749)

尾矿库水体环境抗生素抗性基因的分布特征 黄福义, 朱永官, 苏建强(761)

涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析 郑涛, 焦团理, 胡波, 龚建师, 侯香梦, 王赫生(766)

天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析 何明霞, 张兵, 夏文雪, 崔旭, 王中良(776)

秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响 张万锋, 杨树青, 孙多强, 靳亚红, 姜帅, 刘鹏(786)

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性 张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟(796)

浮游植物群落及粒径结构对光吸收特性的影响 黄新, 施坤, 张运林, 朱广伟, 周永强(808)

松花江干流2014~2019年夏季着生藻类群落结构特征及其对环境因子的响应 于宗良, 陈威, 赵然, 李中宇, 董英莉, 张蕊, 王业耀, 金小伟(819)

汛期前后老鹳河干流人类干扰下浮游细菌多样性及功能预测 韩雪梅, 龚子乐, 杨晓明, 李玉英, 陈兆进, 朱会会, 王凡梅(831)

两种典型PPCPs在潜流人工湿地中的季节性去除效果及降解产物 李超予, 杨怡潇, 张宁, 谢惠君, 胡振, 张建(842)

人工生态系统对城市河流中抗生素和ARGs的去除 周海东, 黄丽萍, 陈晓萌, 李丹妍, 李昕, 崔锦裕(850)

紫外氯胺组合消毒供水系统中病毒微生物的分布特征 韩雪, 孙坚伟, 张力, 王哲明, 白晓慧(860)

高炉水渣负载硫化纳米零价铁对水中土霉素的去除 孙秋楠, 张荣斌, 邓曼君, 李远, 王学江(867)

胺硫改性生物炭对水溶液中不同重金属离子的吸附特性及吸附稳定性 汪存石, 何敏霞, 周峰, 陈靓, 祝建中(874)

电凝聚臭氧氧化耦合工艺的有机物处理特性及去除机制解析 谢新月, 许建军, 张少华, 刘雨果, 金鑫, 金鹏康(883)

微米零价铁对剩余活性污泥和餐厨垃圾厌氧联合消化的加强效果及机制 陈圣杰, 姚福兵, 皮洲洁, 侯坤杰, 何丽, 李小明, 王东波, 杨麒(891)

河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价 孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 乔鹏炜, 卞建林, 陈同斌(900)

南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价 陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 王红, 徐静, 邵京, 简静, 阿克居里·乌尔曼, 沈嘉, 央宗(909)

复合改良剂FZB对砷污染土壤的修复效果 丁萍, 贺玉龙, 何欢, 余江(917)

石灰配施有机物料修复酸性Cd污染稻田 李光辉, 成晴, 陈宏(925)

叶面喷施纳米MnO₂对水稻富集镉的影响机制 周一敏, 黄雅媛, 刘晓月, 李冰玉, 刘羽翼, 李卓晴, 王薪琪, 雷鸣(932)

典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价 王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周蛟, 董金秀, 王佳彬, 余飞(941)

辣椒果实高中低镉积型对镉的富集、转运特性及在亚细胞分布特点比较 邵晓庆, 贺章味, 徐卫红(952)

4种草本植物对镉的富集特征 陈迪, 李伯群, 杨永平, 和兆荣, 李雄(960)

不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征 熊子怡, 郑杰炳, 王丹, 王富华, 王莹燕, 王子芳, 高明(967)

降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤C:N:P生态化学计量特征的影响 高江平, 赵锐锋, 张丽华, 王军锋, 谢忠奎(977)

水分管理对水稻生长与根际激发效应的影响特征 林森, 肖谋良, 江家彬, 魏亮, 李科林, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水(988)

铜胁迫对小麦根系微域微生物群落的影响 葛艺, 徐国民, 徐绍辉, 徐艳(996)

臭氧污染、氮沉降和干旱胁迫交互作用对杨树叶和细根非结构性碳水化合物化合物的影响 李品, 周慧敏, 冯兆忠(1004)

颗粒物有机源示踪物的筛选与应用综述 李源速, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鸷(1013)

《环境科学》征订启事(522) 《环境科学》征稿简则(722) 信息(748, 899, 924)

电凝聚臭氧氧化耦合工艺的有机物处理特性及去除机制解析

谢新月¹, 许建军², 张少华¹, 刘雨果¹, 金鑫¹, 金鹏康^{1*}

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055; 2. 中机国际工程设计研究院有限责任公司华东分院, 南京 210046)

摘要:以污水厂二级出水溶解性有机物强效去除为目的,本研究构建了电凝聚臭氧氧化耦合(E-HOC)体系,明确了该体系对污水厂二级出水及布洛芬的处理特性,探明了有机物的强化去除机制.结果表明,在 pH5 条件下,E-HOC 工艺对二级出水溶解性有机物的去除效果更优,相较于臭氧氧化、电絮凝工艺、预臭氧化-电絮凝工艺、电絮凝串联臭氧工艺以及化学混凝工艺分别提高了 46.4%、20.0%、19.4%、36.1% 和 49.7%.为进一步明确该耦合工艺去除溶解性有机物的机制,基于淬灭实验和 EPR 特征峰谱图分析,证实了金属盐混凝剂可作为催化剂有效地提高羟基自由基($\cdot\text{OH}$)的产量,揭示了该耦合体系存在臭氧混凝协同增效(SOC)反应.傅立叶红外的分析结果表明,Al 阳极电解产生的混凝剂水解物表面羟基为 SOC 反应中产生 $\cdot\text{OH}$ 的活性位点.基于有机物在 E-HOC 体系中的动力学特性,解析了耦合体系中有有机物的去除机制,SOC 反应和臭氧氧化反应在 E-HOC 体系的有机物去除过程中作用显著,SOC 反应为 $\cdot\text{OH}$ 的生成提供了一种新的途径.

关键词:电凝聚臭氧氧化耦合(E-HOC); 协同作用; 电絮凝; 表面羟基; 臭氧化

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)02-0883-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202006158

Characteristics and Removal Mechanism of an Electro-Hybrid Ozonation-Coagulation System in the Treatment of Organic Matters

XIE Xin-yue¹, XU Jian-jun², ZHANG Shao-hua¹, LIU Yu-guo¹, JIN Xin¹, JIN Peng-kang^{1*}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. China Machinery International Engineering Design & Research Institute Co., Ltd. (CMIE) East China Branch, Nanjing 210046, China)

Abstract: To improve the removal efficiency of dissolved organic matter in wastewater treatment plant (WWTP) effluent, electro-hybrid ozonation-coagulation (E-HOC) is proposed and the treatment characteristics and removal mechanism for WWTP effluent and ibuprofen (IBP) are investigated. The E-HOC process has a better removal effect on dissolved organic matter in WWTP effluent, achieving 46.4%, 20.0%, 19.4%, 36.1%, and 49.7% higher removal than EC, ozonation, pre-ozonation-EC, electrocoagulation-ozonation, and chemical coagulation, respectively. To determine the mechanism of the E-HOC process, quenching experiments and electron paramagnetic resonance (EPR) were conducted, which confirmed that metal coagulants can be used as a catalyst to effectively increase the generation of the hydroxyl radical ($\cdot\text{OH}$). Synergistic effects between ozone and the coagulants (SOC) were also found to be involved. Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR) illustrated that the surface hydroxyl groups of the coagulant (hydrolyzed species produced by Al anode electrolysis) were the active sites for the generation of $\cdot\text{OH}$ in the SOC reaction. Based on a kinetics analysis of organic matter removal in the E-HOC system, SOC effects and ozonation played dominant roles in the E-HOC process. Additionally, the SOC created a new pathway for $\cdot\text{OH}$ formation.

Key words: electro-hybrid ozonation-coagulation (E-HOC); synergistic effects; electrocoagulation; surface hydroxyl groups; ozonation

污水深度处理与资源化利用是缓解城市水资源短缺的重要途径,目前污水厂二级出水(wastewater treatment plant effluent, WWTP effluent)通常采用“混凝-沉淀-过滤”传统处理工艺进行深度处理.然而,该工艺存在处理流程冗长、对溶解性有机物的去除效率较低等问题^[1].臭氧能够与有机物反应,改变其分子结构,提高水中有机物的凝聚性^[2],因此臭氧氧化广泛应用于污水深度处理过程中^[3~5],然而,臭氧对有机物的氧化具有选择性,且臭氧仅在低投加量下对后续混凝具有提升作用^[6],由于对臭氧投加量要求苛刻,溶解性有机物去除效率仍难以保证.

对此,本课题组前期构建了臭氧-混凝耦合反应体系(hybrid ozonation-coagulation, HOC),将臭氧氧化与混凝工艺放置于同一个体系内同时作用,臭氧氧化和混凝不存在先后顺序^[7~9],提升了污水深度处理过程中溶解性有机物的去除效率.然而,对于分散式污水深度处理系统与偏远地区污水处理站

收稿日期: 2020-06-15; 修订日期: 2020-07-23

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51708443); 国家重点研发计划项目(2016YFC0400701); 陕西省教育厅重点项目(18JS057); 陕西高校新型智库项目

作者简介: 谢新月(1996~),女,硕士研究生,主要研究方向为水与废水的深度处理技术, E-mail: 569751501@qq.com

* 通信作者, E-mail: pkjin@hotmail.com

而言,投加与配制化学混凝剂会增加其操作维护强度.为解决该问题,HOC工艺中采用电絮凝(EC)工艺替代化学混凝(CC),EC通过金属阳极原位生成絮凝剂,实现了处理系统零加药与无人值守.目前,已有研究将EC与臭氧氧化相结合,并应用于橄榄厂废水处理^[10]、染料脱色^[11]、农药莠去津的降解^[12]和*N,N*-二甲基乙酰胺的降解^[13]等方面.然而,上述研究未能探明EC与臭氧之间协同作用机制,缺乏对有机物去除机制的探究.

本研究通过构建电凝聚臭氧氧化耦合(electro-hybrid ozonation-coagulation, E-HOC)工艺,基于与EC、臭氧氧化工艺和预臭氧化-电絮凝工艺、电絮凝串联臭氧工艺以及CC的对比,探明了E-HOC工艺

的处理特性.通过催化活性位点甄别与活性氧组分解析,进一步阐明了E-HOC体系的作用机制,结合E-HOC体系的有机物去除动力学特性分析,揭示了不同电流密度条件下有机物的去除机制.

1 材料与方法

1.1 实验原水

水样来自西安市某污水处理厂A²/O工艺的二次沉池出水,处理规模为500 000 m³·d⁻¹,实验前样品均经过0.45 μm滤膜(上海新亚)过滤,过滤处理后的水质特征如表1所示.研究E-HOC工艺对布洛芬(IBP)的处理特性时,采用浓度为5 mmol·L⁻¹的IBP体系.

表1 污水处理厂二级出水水质特征

Table 1 Water quality of WWTP effluent

项目	pH	DOC/mg·L ⁻¹	UV ₂₅₄ /cm ⁻¹	色度/c. u.	浊度/NTU
数值	7.36 ± 0.18	7.276 ± 1.943	0.149 ± 0.023	0.042 ± 0.005	2.37 ± 0.32

1.2 实验方法与装置

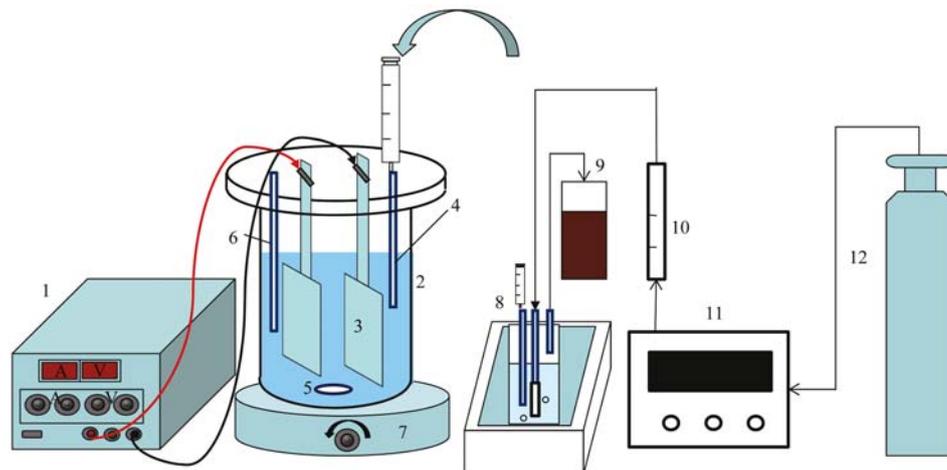
1.2.1 实验装置

采用图1所示的装置进行电凝聚臭氧氧化耦合实验.反应装置为圆柱形有机玻璃电解反应器,高为12 cm,直径为9 cm,实验水样均为500 mL.阳极材料为铝或者钌铱钛电极(Ti/RuO₂-IrO₂),阴极材料为不锈钢(316级),电极完全浸没于水中,其有效表面积为84 cm²[7 cm × 6 cm × 0.1 cm(长 × 宽 × 厚度)],电极之间的间距为2 cm.在实验开始前,先用砂纸打磨电极,再用1 mol·L⁻¹ HCl溶液清洗10 min,再依次用去离子水冲洗,最后烘干使用.电极直接连接到稳压直流电源(无锡安耐斯,JP5200D).

采用磁力搅拌器(德国IKA,color squid)对反应器以100 r·min⁻¹的搅拌速度进行搅拌.饱和臭氧水的制备装置如图1所示,通过气体流量计控制氧气源臭氧发生器(济南三康,SK-CFQ-3P)出口流量在16 L·h⁻¹左右,持续曝气约2 h,臭氧即可达到饱和,臭氧水的浓度通过靛蓝比色法进行测定,未在装置内反应的臭氧气体通入20%的KI吸收瓶.

1.2.2 实验方法

使用0.1 mol·L⁻¹ NaOH溶液和(1+9) HNO₃调节水样pH,并加入0.2 mmol·L⁻¹磷酸盐缓冲液以控制pH在5 ± 0.2、7 ± 0.2和9 ± 0.2附近.实验开始前,设置好电流密度(5、10、15和20 mA·cm⁻²),



1. 直流电源; 2. 反应装置; 3. 极板; 4. 臭氧水注入管; 5. 转子; 6. 取样管; 7. 磁力搅拌器;
8. 臭氧制备装置; 9. KI吸收瓶; 10. 电磁流量计; 11. 氧气源臭氧发生器; 12. 氧气瓶

图1 E-HOC实验装置示意

Fig. 1 E-HOC batch experiment setup

确定臭氧水的投加量为 1.5 mg (以 O_3/DOC 计) 和 $10.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (根据二级出水中臭氧投加量获得)。将臭氧水加入电解槽后迅速打开直流电源, 此时, EC 和臭氧氧化等反应同时发生。探究电凝聚臭氧氧化耦合体系对二级出水的处理特性时, 反应时间为 15 min , 反应结束后通过取样管取样, 经 $0.45 \mu\text{m}$ 的滤膜(上海新亚)过滤后测定 DOC, 测定结果均重复 3 遍。探究电凝聚臭氧氧化耦合体系对 IBP 的处理特性时, 反应时间为 10 min , 所取样品经 $0.45 \mu\text{m}$ 的滤膜过滤, 取样后应立即加入 $0.025 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 硫代硫酸钠 ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) 和 $0.025 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 亚硫酸钠 (Na_2SO_3) 分别淬灭残余羟基自由基 ($\cdot\text{OH}$) 和臭氧, 防止水样的进一步氧化。

1.3 指标分析测定方法

1.3.1 pH 的测定

采用上海雷磁 PHB-4 型精密酸度计测定。

1.3.2 液态臭氧浓度的测定

采用靛蓝比色法^[14]测定。

1.3.3 DOC 的测定

采用日本岛津生产的 $\text{TOCV}_{\text{CPII}}$ 分析仪测定。测定前样品需经 H_2SO_4 酸化并用氮气吹脱 3 min , 从而去除水样中的大部分无机碳, 保证测定值的准确性。

1.3.4 IBP 去除率的测定

IBP 去除率以及淬灭实验均采用高效液相色谱(日本岛津, LC-2010AHF)测定, 色谱柱为大连依利特 $5 \mu\text{m}$ 反相 C18 柱 ($4.6 \text{ mm}\times 250 \text{ mm}$), 流动相为乙腈: 水 = 70: 30 (磷酸调 pH 为 2), 流速 $1.0 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 柱温 35°C , 进样量 $20 \mu\text{L}$, 检测波长为 220 nm 。

1.3.5 傅立叶漫反射红外光谱仪(FT-IR)分析

将样品用真空冷冻干燥机(北京博益康, FD-1-50)干燥 48 h 。将 10 mg 干燥后的絮体样品和 990 mg KBr 混匀并碾磨压片后, 利用 FT-IR(英国热电, Nicolet x700)进行有机物官能团的分析, 测定频率范围为 $4000 \sim 500 \text{ cm}^{-1}$ 。

1.3.6 羟基自由基浓度的测定

通过添加异丙醇(IPA)作为 $\cdot\text{OH}$ 捕获剂来间接测定 $\cdot\text{OH}$ 浓度时, 在实验开始前向体系中加入 $5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ IPA, 重复上述过程。通过电子顺磁共振仪(EPR)直接测定 $\cdot\text{OH}$ 浓度时, 取适量电絮凝 5 min 时的样品加入 1.5 mL 的样品瓶中, 再同时加入适量臭氧水和 $100 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ DMPO, 并立即用 EPR 进行测定(瑞士布鲁克, ZMXmicro-6/1)。测定参数为共振频率 9.77 GHz 、微波功率 25.18 mW 、调制频率 100 kHz 、调制振幅 1.0 mT 、测试宽度 $700 \times 10^{-4} \text{ T}$ 、时间常数 81.92 ms 、扫描时间 35 s 和接收器增益 30 dB 。

2 结果与讨论

2.1 电凝聚臭氧氧化耦合体系的处理特性

2.1.1 电凝聚臭氧氧化耦合体系对二级出水的处理特性

图 2 为不同 pH 条件下臭氧投加量为 1.5 mg (以 O_3/DOC 计), 电流密度为 $15 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时 E-HOC、EC、臭氧氧化工艺 (ozonation)、预臭氧-混凝工艺 (pre-ozonation-EC)、电絮凝串联臭氧工艺 (EC- O_3) 以及 CC 工艺对二级出水的处理特性。从中可知, E-HOC 体系相比于其他工艺, 在不同 pH 条件下, 对溶解性有机物 (DOC) 的去除效果均最优。相较于 EC, E-HOC 对 DOC 的去除率在 pH 为 5、7 和 9 条件下分别提高了 20.0%、14.8% 和 8.6%, 可能是由于臭氧的引入增加了体系中 $\cdot\text{OH}$ 的产生, 从而促进有机物的去除。同时, E-HOC 相较于预臭氧-混凝工艺在 pH 为 5、7 和 9 条件下分别提高了 19.4%、17.5% 和 10.2%。预臭氧-混凝工艺与 EC 工艺相比, 去除效率的提升十分有限, 甚至降低了有机物的去除效率, Edwards 等^[15]的研究也表明, 在臭氧投加量较高时, 臭氧预氧化会降低后续的电絮凝效果。E-HOC 工艺相较于 EC- O_3 工艺, 对 DOC 的去除效果更好, 这与 Bilińska 等^[16]在研究 E-HOC 与 EC- O_3 工艺处理纺织废水回用的结果一致, 其研究结果表明, EC 与 O_3 的耦合显著提高了 DOC 的去除率, 两者之间存在协同作用, 相比于 EC- O_3 工艺, 表现出更高的 DOC 去除率。EC 相较于 CC 工艺, 在 pH 为 5、7 和 9 条件下对 DOC 的去除率分别提高了 29.7%、19.6% 和 24.0%, 是因为 EC 工艺的极板接触面积大, 有利于 Al^{3+} 和单核水解产物的快速水解和扩散。相较于 E-HOC 在初始 pH 为 5 时的 DOC 去除率 (58.6%) 明显高于初始 pH 为 7 (45.2%) 和 9 (42.2%) 时的去除率。随着 pH 的升高, 溶液中

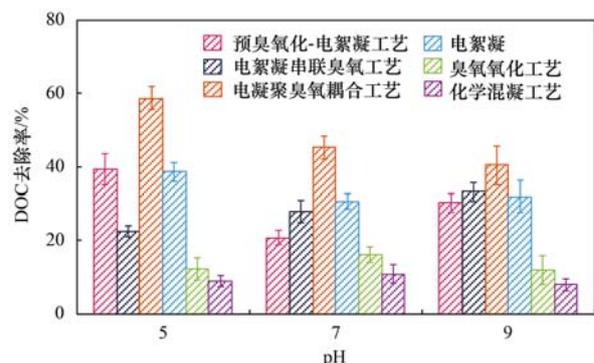


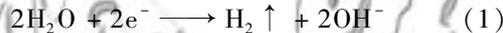
图 2 不同初始 pH 条件下电凝聚臭氧氧化耦合工艺的水厂二级出水处理特性

Fig. 2 WWTP effluent organic removal efficiency of E-HOC at different initial pH values

OH^- 的数量增加,溶解性 $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ 离子大量产生^[17],该物质的生成降低了混凝剂电中和的能力,从而造成有机物的去除效率的降低,因此,选择 $\text{pH} = 5$ 为本研究的最佳 pH 条件。

2.1.2 电凝聚臭氧氧化耦合体系对 IBP 的处理特性

比较臭氧投加量为 $10.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,电流密度为 $15 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, $\text{pH} 5$ 条件下 Al-E-HOC(以 Al 极板作为阳极)、臭氧氧化工艺、EC 以及 Ti/RuO₂-IrO₂-E-HOC(以 Ti/RuO₂-IrO₂ 极板作为阳极)对 IBP 的去除效果,结果如图 3 所示。Al-E-HOC 相比于其他工艺对 IBP 的去除效果最好,可完全去除,而混凝过程几乎不能去除 IBP。由于 IBP 和臭氧(O₃)反应速率较慢 $[k_{\text{O}_3,\text{IBP}} = 9.6 \text{ L}\cdot(\text{mol}\cdot\text{s})^{-1}]$ ^[18],臭氧氧化工艺对 IBP 的去除能力有限。为了排除 Al-E-HOC 体系内 Al^{3+} 及其水解产物的影响,采用 Ti/RuO₂-IrO₂ 代替 Al 阳极^[13],通过两种体系的对比,发现 Ti/RuO₂-IrO₂-E-HOC 体系的去除效率明显降低,证明了 Al 阳极产生的金属盐混凝剂可能与臭氧存在协同作用,强化体系的处理能力。此外,Ti/RuO₂-IrO₂-E-HOC 体系相较于臭氧氧化工艺具有更高的去除率,这可能是由于 Ti/RuO₂-IrO₂ 电极导电性更强,提升了阴极的给电子能力,促进了 OH^- 的生成[公式(1)], OH^- 可进一步引发 O₃ 分解产生 $\cdot\text{OH}$ ^[19]。



2.2 电凝聚臭氧氧化耦合体系机制研究

2.2.1 电凝聚臭氧氧化耦合体系中 $\cdot\text{OH}$ 的产生

为了探究 E-HOC 体系中 $\cdot\text{OH}$ 的产生,添加 IPA 作为 $\cdot\text{OH}$ 探针 $[1.9 \times 10^{10} \text{ L}\cdot(\text{mol}\cdot\text{s})^{-1}]$ ^[20],以 IBP 为目标污染物,探究体系中 $\cdot\text{OH}$ 对 E-HOC 体系有机物去除效果的影响,结果如图 4(a) 所示,体系中引入 IPA 后,IPA 抑制了 IBP 的去除率,说明体系产生了大量 $\cdot\text{OH}$ 。Al-E-HOC 体系相比 Ti/RuO₂-IrO₂-E-HOC 体系,对 IBP 的去除抑制作用更为明显,说明

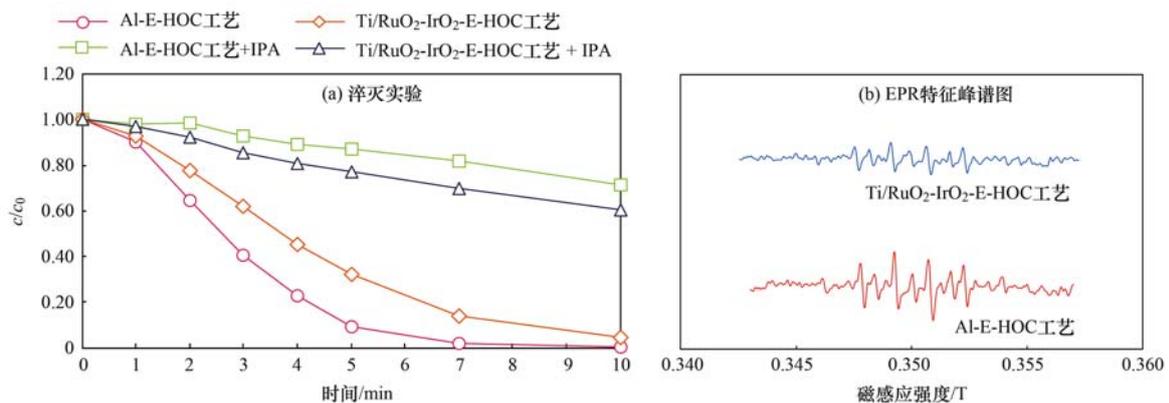


图 4 E-HOC 体系中 $\cdot\text{OH}$ 的测定

Fig. 4 Determination of $\cdot\text{OH}$ in the E-HOC process

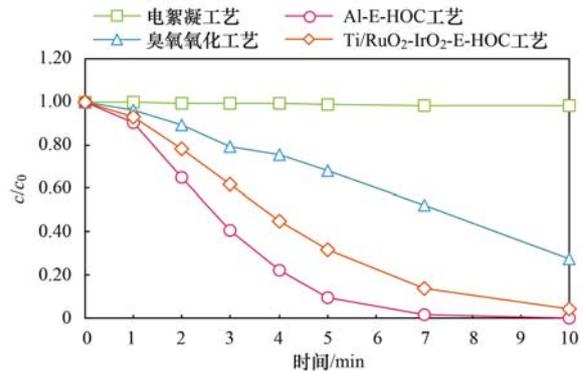


图 3 不同工艺对布洛芬的处理特性对比

Fig. 3 Comparison of the removal efficiency of ibuprofen by different processes

Al-E-HOC 体系会产生更多的 $\cdot\text{OH}$,进一步表明该体系可能存在臭氧混凝协同增效 (synergistic effects between ozone and coagulants, SOC) 作用,金属盐混凝剂及其水解产物将作为催化剂促进臭氧分解为氧化能力更强的 $\cdot\text{OH}$ ^[5,21],从而提高溶解性有机物的去除效率。

为了进一步验证 Al-E-HOC 中 $\cdot\text{OH}$ 的产生,采用 DMPO 作为捕获剂进行 EPR 分析^[22]。在臭氧投加量为 $10.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,电流密度为 $15 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, $\text{pH} 5$ 条件下 Al-E-HOC 和 Ti/RuO₂-IrO₂-E-HOC 体系得到的 DMPO- $\cdot\text{OH}$ 的 EPR 特征峰谱图,如图 4(b) 所示。该 EPR 谱图存在一个以 $3.500 \times 10^{-4} \text{ T}$ 为中心的 4 峰,峰高比为 1:2:2:1,这是典型的 DMPO- $\cdot\text{OH}$ 图谱^[23],这说明了体系中有 $\cdot\text{OH}$ 的存在。结果表明,相较于 Ti/RuO₂-IrO₂-E-HOC 体系,Al-E-HOC 中由于金属盐混凝剂的存在,产生了更多的 $\cdot\text{OH}$,进一步证明了 Al-E-HOC 体系中存在臭氧与金属盐混凝剂的协同增效作用。

2.2.2 金属盐混凝剂水解产物的活性点位甄别

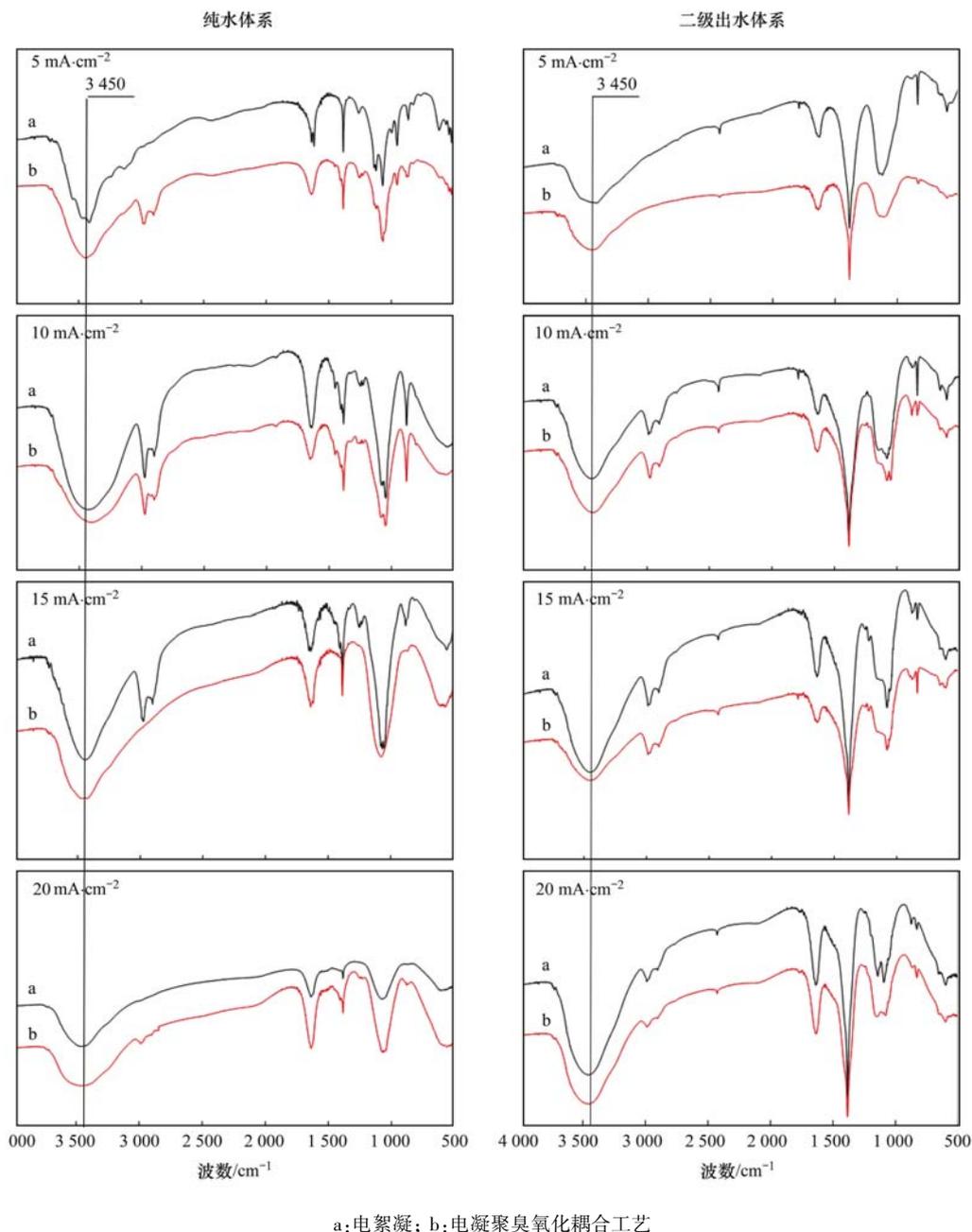
由于 E-HOC 体系中存在混凝剂与臭氧的协同增效作用,混凝剂水解产物可以作为臭氧的催化剂,

促进臭氧分解产生 $\cdot\text{OH}$,为了进一步明确 E-HOC 体系中混凝剂表面催化臭氧化的活性点位,本研究分别对纯水体系和二级出水体系下,投加臭氧前后的混凝剂表面官能团变化进行了 FT-IR 分析,结果如图 5 所示. 从中可知,EC 体系和 E-HOC 体系均在 $3\,450\text{ cm}^{-1}$ 处出峰. O'Reilly 等^[24,25]的研究结果表明,在 $3\,450\text{ cm}^{-1}$ 处的峰为混凝剂表面羟基. 从图 5 可以看出,在纯水体系中,随着电流密度的增大, $3\,450\text{ cm}^{-1}$ 处羟基的峰强度增大. 这可能是因为较高的电流密度下铝阳极的溶解速率增大的结果,在原位形成的铝盐混凝剂表面形成了更多的羟基. 因此,在较高的电流密度下,混凝剂表面可能存在更多的催化活

性点位^[26]. 然而,在 $20\text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时,会产生大量的可溶性 $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ 离子,导致混凝絮体样品中可测出的羟基的峰强度降低. 此外,当体系中引入臭氧时,原位形成的铝盐混凝剂表面羟基的峰强度在各电流密度下均显著降低,这说明催化剂表面的羟基和臭氧发生了反应. 由于臭氧具有偶极子的特性,因此会被催化剂表面的路易斯酸点位吸附^[27,28],通过进一步地分解作用产生 $\cdot\text{OH}$. 因此,铝盐混凝剂水解产物的表面羟基是生成 $\cdot\text{OH}$ 的活性点位.

2.3 电凝聚臭氧氧化耦合体系中有有机物强化去除途径解析

基于以上结果,Al-E-HOC 体系中可能存在臭



a:电絮凝; b:电凝聚臭氧氧化耦合工艺

图 5 臭氧投加前后体系 FT-IR 分析

Fig. 5 FT-IR analysis of the system before and after ozone dosing

氧化(ozonation)、EC和SOC这3种反应. 为了获得每个反应在不同电流密度条件下对IBP的去除贡献,在初始pH值为5,臭氧投加量为 $10.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的条件下,对Al-E-HOC中的IBP进行动力学分析(图6),从而得到了不同体系的拟一级反应速率常数(k_{obs}),如表2所示. 可以通过计算每个反应的 k_{obs} 在Al-E-HOC(k_{obs})中所占比例,来解析Al-E-HOC体系中有机的强化去除途径及其贡献率^[29,30].

根据EC的 k_{obs} ,得到EC在电流密度为5、10、15和 $20 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时的贡献率分别为0.23%、0.36%、0.30%和0.42%(图7). 随后,通过使用

Ti/RuO₂-IrO₂电极代替Al阳极^[13],SOC反应和EC反应均被屏蔽,因此可以得到臭氧氧化反应的贡献率,在电流密度为5、10、15和 $20 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时分别为47.59%、53.34%、54.45%和54.08%. 在扣除EC和Ti/RuO₂-IrO₂-E-HOC的 k_{obs} 后,SOC反应在电流密度为5、10、15及 $20 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时的贡献率分别为52.18%、46.30%、45.25%及45.49%. 在不同电流密度条件下,SOC反应在Al-E-HOC体系中对IBP的去除贡献均较为稳定. 在初始pH为5时,SOC反应和臭氧氧化反应在Al-E-HOC过程中起同样重要的作用,而SOC反应增加了自由基产生的新途径,大幅度提升了自由基的产量.

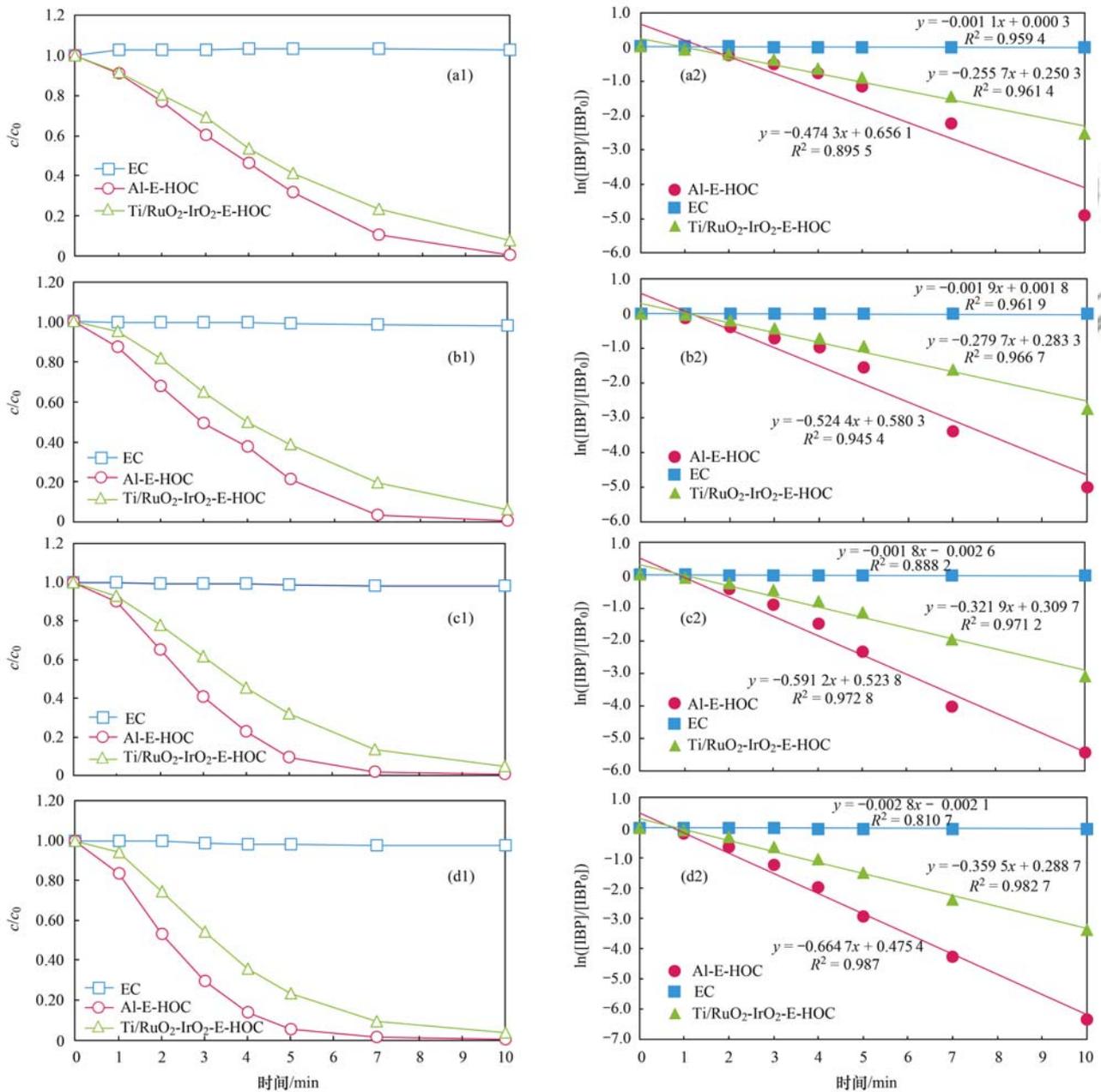


图6 不同电流密度的IBP的去除曲线以及伪一级速率常数分析

Fig. 6 Removal efficiency of IBP at different current densities and the analysis of the pseudo-first-order rate constant

表 2 不同电流密度的各反应的伪一阶速率常数

Table 2 Pseudo-first-order rate constants for reactions at different current densities

项目	存在的反应	k_{obs}/min^{-1}			
		$5 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	$10 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	$15 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	$20 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$
Al-E-HOC	EC、臭氧氧化和 SOC	0.474 3	0.524 4	0.591 2	0.664 7
EC	EC	0.001 1	0.001 9	0.001 8	0.002 8
Ti/RuO ₂ -IrO ₂ -E-HOC	臭氧氧化	0.255 7	0.279 7	0.321 9	0.359 5

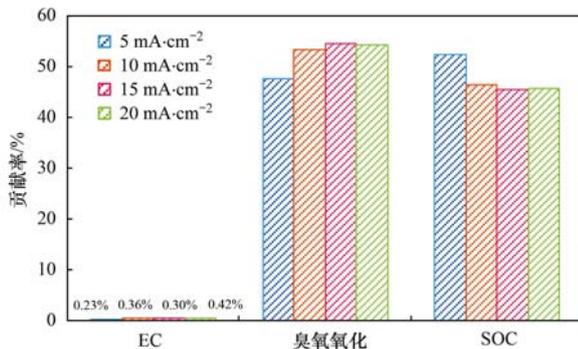


图 7 不同电流密度下各反应在 IBP 去除过程中的贡献率

Fig. 7 Contribution of each reaction in the process of IBP removal at different current densities

3 结论

(1) 在初始 pH 为 5 时, E-HOC 工艺对二级出水 DOC 去除效果最好, 相较于臭氧氧化、电絮凝工艺、预臭氧化-电絮凝工艺、电絮凝串联臭氧工艺以及化学混凝工艺分别提高了 46.4%、20%、19.4%、36.1% 和 49.7%。

(2) 电解产生的 Al 盐混凝剂及其水解产物可作为催化剂, 促进臭氧分解为氧化能力更强的·OH, 强化臭氧氧化效果, 提高溶解性有机物的去除效率。FT-IR 的分析结果表明, 混凝剂水解产物的表面羟基为 SOC 反应产生·OH 的活性位点。

(3) E-HOC 体系有机物的去除机制包含臭氧氧化、EC 和 SOC 这 3 种途径, 在初始 pH 为 5 时, 不同电流密度条件下, SOC 反应和臭氧氧化反应在 E-HOC 体系中均起到主要作用, SOC 反应增加了·OH 产生的新途径。

参考文献:

[1] Jin P K, Jin X, Wang X C, *et al.* An analysis of the chemical safety of secondary effluent for reuse purposes and the requirement for advanced treatment[J]. *Chemosphere*, 2013, **91** (4): 558-562.

[2] Pei Y S, Yu J W, Guo Z H, *et al.* Pilot study on pre-ozonation enhanced drinking water treatment process[J]. *Ozone: Science & Engineering*, 2007, **29**(5): 317-323.

[3] Yang K, Yu J W, Guo Q Y, *et al.* Comparison of micropollutants removal performance between pre-ozonation and post-ozonation using a pilot study[J]. *Water Research*, 2017, **111**: 147-153.

[4] 郑晓英, 王俭龙, 李鑫玮, 等. 臭氧氧化深度处理二级处理出水的研究[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(5): 1159-1165.

Zheng X Y, Wang J L, Li X W, *et al.* Advanced treatment of secondary effluent by ozonation [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(5): 1159-1165.

[5] 全贵婵, 叶裕才, 云桂春, 等. 城市污水深度处理中有机物的去除[J]. *环境科学*, 2000, **21**(6): 73-76.

Tong G C, Ye Y C, Yun G C, *et al.* Removal of organism from secondary effluent in advanced wastewater treatment for groundwater recharge [J]. *Environmental Science*, 2000, **21** (6): 73-76.

[6] Jin P K, Jin X, Bjerkelund V A, *et al.* A study on the reactivity characteristics of dissolved effluent organic matter (EfOM) from municipal wastewater treatment plant during ozonation[J]. *Water Research*, 2016, **88**: 643-652.

[7] Jin X, Jin P K, Hou R, *et al.* Enhanced WWTP effluent organic matter removal in hybrid ozonation-coagulation (HOC) process catalyzed by Al-based coagulant [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, **327**: 216-224.

[8] Jin X, Shi Y, Hou R, *et al.* Role of Al-based coagulants on a hybrid ozonation-coagulation (HOC) process for WWTP effluent organic matter and ibuprofen removal [J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2019, **5** (3): 599-608.

[9] 侯瑞, 金鑫, 金鹏康, 等. 臭氧-混凝耦合工艺污水深度处理特性及其机制[J]. *环境科学*, 2017, **38**(2): 640-646.

Hou R, Jin X, Jin P K, *et al.* Chaeacteeistics and mechanism of hybeid ozonation-coagulation peecess in wastewatee reclamation [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(2): 640-646.

[10] Romero-Barranco C, García-Serrano P, García-García P, *et al.* Re-use of partially purified iron color fixation solutions using electro-coagulation and ozonation in ripe table olive processing and packaging[J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, **181**: 28-34.

[11] Behin J, Farhadian N, Ahmadi M, *et al.* Ozone assisted electrocoagulation in a rectangular internal-loop airlift reactor: application to decolorization of acid dye[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2015, **8**: 171-178.

[12] Saylor G L, Zhao C, Kupferle M J. Synergistic enhancement of oxidative degradation of atrazine using combined electrolysis and ozonation[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2018, **21**: 154-162.

[13] Xiong Z K, Lai B, Yang P. Insight into a highly efficient electrolysis-ozone process for *N, N*-dimethylacetamide degradation: quantitative analysis of the role of catalytic ozonation, fenton-like and peroxone reactions [J]. *Water Research*, 2018, **140**: 12-23.

[14] Bader H, Hoigné J. Determination of ozone in water by the indigo method[J]. *Water Research*, 1981, **15**(4): 449-456.

[15] Edwards M, Benjamin M M. Effect of preozonation on coagulant-NOM interactions [J]. *Journal of the American Water Works Association*, 1992, **84**(8): 63-72.

[16] Bilińska L, Blus K, Gmurek M, *et al.* Coupling of electrocoagulation and ozone treatment for textile wastewater reuse

- [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, **358**: 992-1001.
- [17] Hu C Z, Wang S Q, Sun J Q, *et al.* An effective method for improving electrocoagulation process: Optimization of Al₁₃ polymer formation[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2016, **489**: 234-240.
- [18] Li X, Wang Y J, Yuan S, *et al.* Degradation of the anti-inflammatory drug ibuprofen by electro-peroxone process [J]. Water Research, 2014, **63**: 81-93.
- [19] Buhler R, Staehelin J, Hoigne J. Ozone decomposition in water studied by pulse radiolysis 1. HO₂/O₂⁻ and HO₃/O₃⁻ as intermediates-correction[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 1994, **88**(22), doi: 10.1021/j150656a026.
- [20] 苏海英, 王盈霏, 王枫亮, 等. g-C₃N₄/TiO₂ 复合材料光催化降解布洛芬的机制[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(1): 195-202.
Su H Y, Wang Y F, Wang F L, *et al.* Preparation of g-C₃N₄/TiO₂ composites and the mechanism research of the photocatalysis degradation of ibuprofen [J]. China Environmental Science, 2017, **37**(1): 195-202.
- [21] Jin X, Wang Y, Zhang W J, *et al.* Mechanism of the hybrid ozonation-coagulation (HOC) process: comparison of preformed Al₁₃ polymer and *in situ* formed Al species [J]. Chemosphere, 2019, **229**: 262-272.
- [22] 钟萍, 孔令仁, 冯建芳, 等. 水体系中正癸烷和正癸烯的光催化降解[J]. 中国环境科学, 2003, **23**(2): 122-126.
Zhong P, Kong L R, Feng J F, *et al.* Photocatalytic degradation of n-decane and n-decene in water system [J]. China Environmental Science, 2003, **23**(2): 122-126.
- [23] Han S K, Ichikawa K, Utsumi H. Quantitative analysis for the enhancement of hydroxyl radical generation by phenols during ozonation of water[J]. Water Research, 1998, **32**(11): 3261-3266.
- [24] O'Reilly J M, Mosher R A. Functional groups in carbon black by FTIR spectroscopy[J]. Carbon, 1983, **21**(1): 47-51.
- [25] Maneewong A, Seong B S, Shin E J, *et al.* Color change of tourmaline by heat treatment and electron beam irradiation: UV-Visible, EPR, and Mid-IR spectroscopic analyses[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2016, **68**(1): 83-92.
- [26] Qiu R L, Zhang D D, Diao Z H, *et al.* Visible light induced photocatalytic reduction of Cr(VI) over polymer-sensitized TiO₂ and its synergism with phenol oxidation [J]. Water Research, 2012, **46**(7): 2299-2306.
- [27] Yang L, Hu C, Nie Y L, *et al.* Surface acidity and reactivity of β-FeOOH/Al₂O₃ for pharmaceuticals degradation with ozone: *in situ* ATR-FTIR studies [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2010, **97**(3-4): 340-346.
- [28] Li Y, Hu C, Nie Y L, *et al.* Catalytic ozonation of selected pharmaceuticals over mesoporous alumina-supported manganese oxide[J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(7): 2525-2529.
- [29] Mu Y, Ai Z H, Zhang L Z. Phosphate shifted oxygen reduction pathway on Fe@Fe₂O₃ core-shell nanowires for enhanced reactive oxygen species generation and aerobic 4-chlorophenol degradation [J]. Environmental Science & Technology, 2017, **51**(14): 8101-8109.
- [30] Liu W, Ai Z H, Cao M H, *et al.* Ferrous ions promoted aerobic simazine degradation with Fe@Fe₂O₃ core-shell nanowires [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2014, **150-151**: 1-11.

CONTENTS

Health Impact Attributable to the Control of PM _{2.5} Pollution in China During 2013-2017	ZHANG Meng-jiao, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (513)
Contributions of Emissions Reduction and Regional Meteorological Conditions to Air Quality Improvement	WU Wen-qi, ZHANG Kai-shan (523)
Air Pollution Characteristics and Quantitative Evaluation of Multi-scale Transport in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in January, 2016	YAO Sen, ZHANG Han-yu, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (534)
Influence of Burning Fireworks on the Atmosphere During the Spring Festival in Guangzhou in 2020	PEI Cheng-lei, WANG Yu-jun, BI Yan-ru, <i>et al.</i> (546)
Source Apportionment and Optical Properties of Fine Particles Associated with Regional Pollution in the Yangtze River Delta	XIA Li, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (556)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Ions in Particulate Matter Under Different Weather Processes in Nanjing	ZHANG Yang, WANG Hong-lei, LIU An-kang, <i>et al.</i> (564)
Size Distribution of Aerosol Hygroscopic Growth Factors in Winter in Tianjin	DING Jing, ZHANG Yu-fen, ZHENG Nai-yuan, <i>et al.</i> (574)
Time-Determination and Contribution Analysis of Transport, Retention, and Offshore Backflow to Long-Term Sand-Dust Coupling	ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (584)
Characterization, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs During Autumn and Winter in Luoyang City	QI Jing-wen, ZHANG Rui-qin, JIANG Nan, <i>et al.</i> (595)
Characteristics, Meteorological Influences, and Transport Source of Ozone Pollution in Zhengzhou City	WANG Xu-dong, YIN Sha-sha, WANG Jian, <i>et al.</i> (604)
Nonlinear Response Characteristics and Control Scheme for Ozone and Its Precursors Based on Orthogonal Experimental Methods	LI Guang-yao, CHEN Qiang, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (616)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Automobile Industrial Park of Shanghai	YE Lu, TAI Qing-qing, YU Hua-ming (624)
Establishment of a High-resolution Anthropogenic Emission Inventory and Its Evaluation Using the WRF-Chem Model for Lanzhou	GUO Wen-kai, LI Guang-yao, CHEN Bing, <i>et al.</i> (634)
Trends in Vehicle Emissions in Sichuan Province, 2010-2017	LI Yuan, SHI Jia-cheng, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (643)
Bioavailability and Ecological Risk Assessment of Cadmium in the Sea-Land Interaction Sediments of the Pearl River Delta	WANG Fang-ting, BAO Ke, CHEN Zhi-hua, <i>et al.</i> (653)
Distribution, Sources, and Ecological Risks of Polyfluoroalkyl Substances in the Surface Water of the Wuliangshui Watershed	SHI Rui, MAO Ruo-yu, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (663)
Distribution Characteristics of Microplastics in Ice Sheets and Its Response to Salinity and Chlorophyll a in the Lake Wuliangshui	WANG Zhi-chao, YANG Jian-lin, YANG Fan, <i>et al.</i> (673)
Effect of Check Dam on Phosphorus Transport and Retention in the Qingshui River, in Zhangjiakou City	WANG Wei, LI Xu-yong (681)
Characteristics of Phosphorus Speciation and Genesis in Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, WANG Li-jing, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (688)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in Lake Chaohu Sediments and Pollution Evaluation	WANG Yan-ping, XU Wei-wei, HAN Chao, <i>et al.</i> (699)
Sediment Pollution Characteristics and Dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake	YANG Pan, YANG Chun-hui, MA Xin-yu, <i>et al.</i> (712)
Effect of Oxidation Strengthening on In-situ Phosphorus Immobilization of Calcium Hydroxide	XU Chu-tian, LI Da-peng, YUE Wei, <i>et al.</i> (723)
Impact of Rainfall-Runoff Events on Methane Emission from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	CHEN Min, XU Hao-ting, WANG Xue-zhu, <i>et al.</i> (732)
Water-air Carbon Dioxide Exchange and Nutritional Controls in a Typical Karst River	LIU Rui, ZHANG Jin, CHEN Zu-sheng, <i>et al.</i> (740)
Occurrence of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Representative Drinking Water Resources in Jiangsu Province	WANG Long-fei, CHENG Yi-qun, HU Xiao-dong, <i>et al.</i> (749)
Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Tailings Ponds	HUANG Fu-yi, ZHU Yong-guan, SU Jian-qiang (761)
Hydrochemical Characteristics and Origin of Groundwater in the Central Guohe River Basin	ZHENG Tao, JIAO Tuan-li, HU Bo, <i>et al.</i> (766)
Hydrochemical Characteristics and Analysis of the Qililai Wetland, Tianjin	HE Ming-xia, ZHANG Bing, XIA Wen-xue, <i>et al.</i> (776)
Effects of Straw Mulching and Nitrogen Reduction on the Distribution of Soil Nitrogen and Groundwater Nitrogen Pollution	ZHANG Wan-feng, YANG Shu-qing, SUN Duo-qiang, <i>et al.</i> (786)
Precision of eDNA Metabarcoding Technology for Biodiversity Monitoring of Eukaryotic Phytoplankton in Lakes	ZHANG Li-juan, XU Shan, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (796)
Effect of Phytoplankton Community Composition and Size Structure on Light Absorption Properties	HUANG Xin, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (808)
Periphytic Algae Community Structure and Its Relation to Environment Factors in the Main Stream of the Songhua River from 2014 to 2019	YU Zong-ling, CHEN Wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (819)
Diversity and Function Prediction of Bacterioplankton Under Human Disturbance in the Main Stream of the Laoguan River Before and After the Flood Season	HAN Xue-mei, GONG Zi-le, YANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (831)
Seasonal Removal Efficiency and Degradation Products of Two Typical PPCPs in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Chao-yu, YANG Yi-xiao, ZHANG Ning, <i>et al.</i> (842)
Removal of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes from Urban Rivers Using Artificial Ecosystems	ZHOU Hai-dong, HUANG Li-ping, CHEN Xiao-meng, <i>et al.</i> (850)
Distribution Characteristics of Viruses Microorganisms in a Water Supply System with Combined Ultraviolet Chloramine Disinfection	HAN Xue, SUN Jian-wei, ZHANG Li, <i>et al.</i> (860)
Removal of Oxytetracycline from Water Using Blast Furnace Slag Loaded Sulfide Nanoscale Zero-valent Iron	SUN Qiu-nan, ZHANG Rong-bin, DENG Man-jun, <i>et al.</i> (867)
Heavy Metal Ion Adsorption Properties and Stability of Amine-sulfur Modified Biochar in Aqueous Solution	WANG Cun-shi, HE Min-xia, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (874)
Characteristics and Removal Mechanism of an Electro-Hybrid Ozonation-Coagulation System in the Treatment of Organic Matters	XIE Xin-yue, XU Jian-jun, ZHANG Shao-hua, <i>et al.</i> (883)
Enhancement Effects and Mechanisms of Microscale Zero Valent Iron on the Performance of Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge and Food Waste	CHEN Sheng-jie, YAO Fu-bing, PI Zhou-jie, <i>et al.</i> (891)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils Surrounding a Typical Industrial Area of Henan Province	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (900)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Greenbelt Soils of Nanjing City	CHEN Jia-lin, LI Ren-ying, XIE Xiao-jin, <i>et al.</i> (909)
Remediation Effect of Compound Modifier FZB on Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	DING Ping, HE Yu-long, HE Huan, <i>et al.</i> (917)
Remediation of Cd Contaminated Acidic Rice Fields Using the Combined Application of Lime and Organic Matter	LI Guang-hui, CHENG Qing, CHEN Hong (925)
Effect and Mechanism of Foliar Application Nano-MnO ₂ on Cadmium Enrichment of Rice	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Xiao-yue, <i>et al.</i> (932)
Characteristics of Cadmium Enrichment and Pollution Evaluation of a Soil-Crop System in a Typical Karst Area	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (941)
Comparison of Enrichment and Transport of Cadmium in the Fruit of High and Low Enrichment Pepper Varieties and Its Distribution in Subcells	SHAO Xiao-qing, HE Zhang-mi, XU Wei-hong (952)
Cadmium Accumulation Characteristics of Four Herbs	CHEN Di, LI Bo-qun, YANG Yong-ping, <i>et al.</i> (960)
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Loss in Purple Soil Sloping Fields with Different Fertilization Treatments	XIONG Zi-yi, ZHENG Jie-bing, WANG Dan, <i>et al.</i> (967)
Effects of Precipitation Changes on Plant Community Diversity and Soil C:N:P Ecological Stoichiometric Characteristics in a Desert Steppe of China	GAO Jiang-ping, ZHAO Rui-feng, ZHANG Li-hua, <i>et al.</i> (977)
Effect of Water Management on Rice Growth and Rhizosphere Priming Effect in Paddy Soils	LIN Sen, XIAO Mou-liang, JIANG Jia-bin, <i>et al.</i> (988)
Effects of Copper Pollution on Microbial Communities in Wheat Root Systems	GE Yi, XU Min-min, XU Shao-hui, <i>et al.</i> (996)
Ozone Pollution, Nitrogen Addition, and Drought Stress Interact to Affect Non-structural Carbohydrates in the Leaves and Fine Roots of Poplar	LI Pin, ZHOU Hui-min, FENG Zhao-zhong (1004)
Review of Screening and Applications of Organic Tracers in Fine Particulate Matter	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1013)