

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第2期

Vol.38 No.2

**2017**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

北京大气颗粒物和重金属铅干沉降通量及季节变化 ..... 姚利, 刘进, 潘月鹏, 田世丽, 王振波, 韦霞, 张国忠, 周保华, 王跃思 (423)

海西城市群 PM<sub>2.5</sub> 中重金属元素的污染特征及健康风险评估 ..... 陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 徐玲玲 (429)

岷泗地区大气 PM<sub>2.5</sub> 中汞形态污染及其与碳组分的关系 ..... 程娜, 钱冠磊, 段炼, 赵梦飞, 修光利 (438)

泰山夏季 PM<sub>2.5</sub> 中二元羧酸类 SOA 的分子组成及来源 ..... 孟静静, 侯战方, 刘晓迪, 邢继钊 (445)

南京北郊大气 BTEX 变化特征和健康风险评估 ..... 张玉欣, 安俊琳, 王健宇, 王俊秀, 师远哲, 刘静达, 梁静舒 (453)

长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单及其对环境的影响 ..... 尤翔宇, 罗达通, 刘湛, 苏艳蓉 (461)

南京城市交通甲烷排放特征 ..... 张雪, 胡凝, 刘寿东, 王淑敏, 高韵秋, 赵佳玉, 张圳, 胡勇博, 李旭辉, 张国君 (469)

2003~2014年东北三省气溶胶光学厚度变化分析 ..... 张宸赫, 赵天良, 王富, 徐祥德, 苏航, 程兴宏, 谭成好 (476)

基于增强回归树的城市 PM<sub>2.5</sub> 日均值变化分析: 以常州为例 ..... 葛跃, 王明新, 孙向武, 齐今笛 (485)

重庆市燃煤电厂汞排放特征及排放量 ..... 张成, 张雅惠, 王永敏, 王定勇, 徐凤, 杨熹, 何秀清 (495)

几种可能来源对广东某地空气中二噁英的影响 ..... 付建平, 韩静磊, 于晓巍, 杨艳艳, 尹文华, 冯桂贤, 张素坤, 黄锦琼, 任明忠 (502)

养鸡场空气中抗性基因和条件致病菌污染特征 ..... 高敏, 仇天雷, 秦玉成, 王旭明 (510)

百年来滇池沉积物中不同形态氮分布及埋藏特征 ..... 吴亚林, 李帅东, 江俊武, 沈胤胤, 黄昌春, 黄涛, 杨浩, 余艳红, 罗玉 (517)

岩溶地下河补给的地表溪流溶解无机碳及其稳定同位素组成的时空变化 ..... 李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶 (527)

三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素 ..... 张佳磊, 郑丙辉, 刘德富, 王丽婧, 谭纤茹 (535)

分层型水库夏季水质对极端厄尔尼诺事件的响应 ..... 邱晓鹏, 黄廷林, 曾明正, 史建超, 曹占辉 (547)

淹水-落干与季节性温度升高耦合过程对消落带沉积物氮矿化影响 ..... 林俊杰, 刘丹, 张帅, 于志国, 何立平, 余顺慧 (555)

湖泊水体中铁(III)-草酸络合物驱动有机磷光解释放磷酸根 ..... 蒋永参, 彭云霄, 刘广龙, 周易勇, 朱端卫 (563)

高效磷吸附剂 Mg/Al-LDO 的制备及除磷机制 ..... 王卫东, 郝瑞霞, 张晓娴, 万京京, 钟丽燕 (572)

改性沸石湿地脱氮除磷效能及机制 ..... 吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 梁奇奇, 沈耀良 (580)

几种水陆交错带植物对底质氮磷释放的抑制作用 ..... 姚程, 胡小贞, 卢少勇, 耿荣妹 (589)

模拟三峡库区消落带优势植物根系低分子量有机酸对土壤中铅的解吸动力学 ..... 何沅洁, 刘江, 江韬, 黄京晶, 成晴, 陈宏 (600)

TiO<sub>2</sub>/膨润土复合材料对 Hg<sup>2+</sup> 的吸附性能研究 ..... 唐兴萍, 周雄, 张金洋, 张成, 王定勇 (608)

氨氮及 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 对溴酸盐和消毒副产物控制的影响 ..... 王永京, 杜旭, 金萌, 冯思捷, 杨凯, 张明露, 于建伟 (616)

配水管网细菌活性影响因素 ..... 王晓丹, 赵新华 (622)

施氏矿物的化学合成及其对含 Cr(VI) 地下水吸附修复 ..... 朱立超, 刘元元, 李伟民, 牟海燕, 王婉玉, 石德智, 王涛 (629)

臭氧-混凝耦合工艺污水深度处理特性及其机制 ..... 侯瑞, 金鑫, 金鹏康, 王晓昌 (640)

单级和多级 A/O 工艺中氮的去除效果及 N<sub>2</sub>O 的产生特性 ..... 郭昌梓, 张凤燕, 刘富宇, 朱超, 裴立影 (647)

有机碳源作用下厌氧氨氧化系统的脱氮效能 ..... 管勇杰, 于德爽, 李津, 齐泮晴, 魏思佳 (654)

完全混合式曝气系统运行特性及微生物群落结构解析 ..... 王硕, 徐巧, 张光生, 李激 (665)

颗粒+絮体污泥 CANON 工艺的启动与 SRT 影响研究 ..... 孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (672)

游离氨调控对污泥高含固厌氧消化反应器性能的影响 ..... 戴晓虎, 何进, 严寒, 李宁, 丁月玲, 董滨, 戴翎翎 (679)

利用卷枝毛霉成球特性高效收获微藻 ..... 顾琼, 金文标, 陈远清, 郭仕达, 万超凡 (688)

零价铁对污泥高温厌氧消化过程中四环素抗性基因及第一类整合子的消减影响 ..... 魏欣, 薛顺利, 杨帆, 李响, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (697)

沈抚新城不同土地利用类型多环芳烃含量、来源及人体健康风险评估 ..... 王静, 刘明丽, 张士超, 鲁垠涛, 姚宏 (703)

河南某市驾校地表灰尘多环芳烃组成、来源与健康风险 ..... 陈轶楠, 马建华, 段海静, 魏林恒 (711)

外源微生物对植物根系修复十溴联苯醚污染底泥的强化作用 ..... 杨雷峰, 尹华, 彭辉, 李跃鹏 (721)

微生物修复油污土壤过程中氮素的变化及菌群生态效应 ..... 叶茜琼, 吴蔓莉, 陈凯丽, 李炜, 袁婧 (728)

沼泽红假单胞菌 PSB06 对辣椒根际微生物群落结构的影响 ..... 罗路云, 金德才, 左晖, 张卓, 谭新球, 张德咏, 卢向阳, 刘勇 (735)

再生水补水对河道底泥细菌群落组成与功能的影响 ..... 邱琰茗, 王广煊, 黄兴如, 郭道宇 (743)

矿区不同植被复垦模式对土壤细菌群落结构的影响 ..... 贺龙, 李艳琴, 李彬春, 李君剑 (752)

稻田土壤固碳功能微生物群落结构和数量特征 ..... 刘琼, 魏晓梦, 吴小红, 袁红朝, 王久荣, 李裕元, 葛体达, 吴金水 (760)

不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤腐殖物质组成及性质的影响 ..... 赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 张霞, 王旭东, 张阿凤 (769)

复合菌剂秸秆堆肥对土壤碳氮含量和酶活性的影响 ..... 聂文翰, 戚志萍, 冯海玮, 孙玉静, 支月娥, 张进忠, 张丹 (783)

秸秆/生物炭施用对关中地区小麦-玉米轮作系统净增温潜势影响的对比分析 ..... 成功, 陈静, 刘晶晶, 张阿凤, 王旭东, 冯浩, 赵英 (792)

1株氯苯高效降解菌的分离鉴定及降解特性 ..... 叶杰旭, 林彤晖, 骆煜昊, 陈东之, 陈建孟 (802)

1株异养反硝化硫细菌的分离鉴定及代谢特性 ..... 谭文勃, 马晓丹, 黄聪, 陈川, 王爱杰 (809)

连续施用污泥堆肥土壤剖面中重金属积累迁移特征及对小麦吸收重金属的影响 ..... 孙娜, 商和平, 茹淑华, 苏德纯 (815)

施氮对小麦硒(VI)吸收、转运和分配的影响 ..... 陈玉鹏, 彭琴, 梁东丽, 宋卫卫, 雷凌明, 喻大松 (825)

长期暴露下纳米二氧化钛对典型淡水藻体砷累积与生物转化的影响 ..... 李金丽, 王振红, 严雅萌, 黄兵, 罗专溪 (832)

不同热解温度制备的玉米芯生物炭对对硝基苯酚的吸附作用 ..... 马锋锋, 赵保卫 (837)

《环境科学》征稿简则(526) 《环境科学》征订启事(720) 信息(678, 696, 844)

# 臭氧-混凝耦合工艺污水深度处理特性及其机制

侯瑞, 金鑫, 金鹏康\*, 王晓昌

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

**摘要:** 针对传统混凝工艺对溶解性有机物去除效果有限的问题, 本文利用臭氧-混凝耦合工艺对污水处理厂二级出水进行深度处理. 与相同混凝剂投量下的预臭氧-混凝工艺和传统混凝工艺相比, 该耦合工艺处理效果明显优于预臭氧-混凝工艺和传统混凝工艺的处理效果. 在两种 pH 条件下耦合工艺对溶解性有机污染物的去除率最大, 分别为 37.96% 和 39.66%. 为了进一步明确该耦合工艺去除溶解性有机物的机制, 测定了两种 pH 和有/无混凝剂  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  存在时对臭氧衰减的影响, 结果表明较高的 pH 和有混凝剂存在时都能够加快臭氧的分解速度. 同时, 选择羟基自由基 ( $\cdot\text{OH}$ ) 的指示剂对氯苯甲酸 (*p*-CBA) 间接计算了  $\cdot\text{OH}$  的暴露量, 结果表明耦合工艺中存在涉及  $\cdot\text{OH}$  产生的高级氧化机制, 而混凝剂可以提高臭氧氧化工艺中  $\cdot\text{OH}$  的产量. 当混凝剂与臭氧接触后, 铝系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  $\cdot\text{OH}$ , 强化臭氧氧化效果, 提高溶解性有机物的去除效率.

**关键词:** 臭氧-混凝耦合工艺; 臭氧氧化; 混凝; 羟基自由基; 污水深度处理

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)02-0640-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201607195

## Characteristics and Mechanism of Hybrid Ozonation-Coagulation Process in Wastewater Reclamation

HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang\*, WANG Xiao-chang

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Because of the limited dissolved organic matter removal efficiency in conventional pre-ozonation-coagulation process, the hybrid ozonation-coagulation (HOC) process was developed for wastewater reclamation in this study. In this process, coagulation and ozonation could synchronize within a single unit. Compared with the pre-ozonation-coagulation process and traditional coagulation process at the same coagulants dosage, the HOC process exhibited higher treatment efficiency, especially better organic matter removal performance at each pH value, which were 37.96% and 39.66%, respectively. In order to obtain the removal mechanism of dissolved organic matters by HOC process, ozone decomposition at two pH values either with or without  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  was monitored in this study. The results showed that higher pH and the addition of coagulant could accelerate ozone decay. In addition, *para*-chlorobenzoic acid (*p*-CBA) was chosen as the hydroxyl radical ( $\cdot\text{OH}$ ) probe compound to indirectly calculate the  $\cdot\text{OH}$  exposure. The results revealed that the HOC process was involved in  $\cdot\text{OH}$  reaction and coagulant could promote ozone decomposition due to its enhancing effect on  $\cdot\text{OH}$  production during the ozonation process. Furthermore, the ozone depletion occurred more quickly at high pH due to its reaction with hydroxide ions ( $\text{OH}^-$ ), leading to the formation of  $\cdot\text{OH}$  through a series of chain reactions. Moreover, the effects of *tert*-butanol, a well-known  $\cdot\text{OH}$  inhibitor on ozone decay and *p*-CBA decomposition were also investigated. The results indicated that ozone depletion and *p*-CBA decomposition were significantly inhibited by *tert*-butanol, which further proved that ozone was decomposed into  $\cdot\text{OH}$  radicals through chain reactions. In the HOC process, Al-based coagulants and hydrolyzed products could act as catalysts to enhance ozone decomposition into  $\cdot\text{OH}$  which is a powerful oxidant to improve the organics removal efficiency.

**Key words:** hybrid ozonation-coagulation (HOC) process; ozonation; coagulation; hydroxyl radical; advanced wastewater treatment

城市污水处理厂二级出水是一种重要的再生水资源,但二级出水中含有大量的溶解性微生物代谢产物,上游饮用水水源中的天然有机物及微量污染物<sup>[1,2]</sup>,难以直接进行回用.而传统的“混凝+沉淀+过滤”处理流程难以适应复杂的水质要求<sup>[3]</sup>,同时常规的氯消毒处理也会产生具有“三致”特性(致癌、致畸、致突变)的消毒副产物(DBPs)<sup>[4,5]</sup>,因此臭氧氧化及其联用技术逐渐成为水处理的重要途径<sup>[6-8]</sup>.

目前常用的联用方式是将预臭氧氧化加入传统的混凝工艺中,可以通过提高原水的可混凝性,来达到

提高后续工艺中污染物去除效率的目的<sup>[9,10]</sup>.虽然适量的臭氧可以起到改善废水中悬浮颗粒的絮凝性能,在一定程度上减少混凝剂投加量的作用<sup>[11,12]</sup>,但是预臭氧-混凝技术对有机物的去除有很大的局限性<sup>[13,14]</sup>.Chang等<sup>[15]</sup>和Yan等<sup>[16]</sup>研究认为较低

收稿日期: 2016-07-27; 修订日期: 2016-09-06

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAC13B06); 国家自然科学基金项目(51378414); 陕西省污水处理与资源化创新团队项目(IRT 2013KCT-13); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-12-1043)

作者简介: 侯瑞(1992~),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: 573103577@qq.com

\* 通信作者, E-mail: pkjin@hotmail.com

的预臭氧剂量是有益的,如果剂量过大会恶化后续的混凝效果. Liu 等<sup>[17]</sup>甚至认为预臭氧化对混凝几乎没有促进作用,而且降低了后续混凝工艺对 DOC 的去除效率. 通常臭氧通过两种途径与有机污染物发生作用;一是臭氧分子与有机污染物通过亲电反应或亲核反应直接氧化作用,该反应进程缓慢,选择性强<sup>[18,19]</sup>;二是臭氧在水中氢氧根(OH<sup>-</sup>)、有机污染物或某些无机物等引发剂的作用下生成羟基自由基( $\cdot$ OH),间接与水中有机污染物发生作用,该反应速度快,选择性低,其反应动力学常数在  $10^8 \sim 10^{10} \text{ L} \cdot (\text{mol} \cdot \text{s})^{-1}$  之间<sup>[20-23]</sup>. 而臭氧氧化效率的提升可以通过采用与双氧水、紫外线和金属离子等联用的方式,以提高 $\cdot$ OH的产率来实现<sup>[24]</sup>. 李华等<sup>[25]</sup>研究认为臭氧-紫外联合预处理的矿化作用主要是通过 $\cdot$ OH实现的, $\cdot$ OH对溶解性腐殖酸的团聚结构产生破坏作用,从而促进对有机物的去除效率. 吴国枝等<sup>[26]</sup>研究了臭氧与光催化和超声等高级氧化技术的不同组合方法对苯酚的降解效果,结果表明联用技术的协同作用生成了更多的强氧化剂 $\cdot$ OH,从而更好地降解水中的有机物. 鉴于此本研究建立臭氧-混凝耦合处理工艺,使混凝剂和臭氧化在一个体系中同时作用. 金属盐混凝剂水解产生的金属离子和一些金属化合物,可以作为催化剂促进 $\cdot$ OH的

产生,从而提高溶解性有机物的去除效率.

本文的主要目的就是探究臭氧-混凝耦合工艺在污水深度处理中的去除特性,揭示该工艺去除溶解性有机物的机制. 本文将在 pH 为 5、7 和混凝剂为  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  的情况下研究耦合工艺的去除特性,并与预臭氧-混凝工艺和传统混凝工艺进行对比. 同时采用 $\cdot$ OH探针法研究耦合工艺中混凝剂对臭氧化过程的促进作用,从而更好地阐述该工艺的作用机制.

## 1 材料与方法

### 1.1 污水处理厂二级出水

本实验以西安市某污水处理厂二级出水作为研究对象,该污水处理厂采用 A<sup>2</sup>O 工艺,处理规模为  $500\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ,实验前样品均需经过  $0.45 \mu\text{m}$  滤膜(上海新亚)过滤. 过滤处理后的水质特征如表 1 所示,碱度、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$  和  $\text{NO}_2^- \text{-N}$  的含量都很低,不会影响后续实验的测定结果. 实验所用的主要试剂包括氯化铝( $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )、靛蓝三磺酸钾、对氯苯甲酸(*p*-CBA)、硫代硫酸钠( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ )、氢氧化钠(NaOH)、磷酸、磷酸二氢钠( $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ )和磷酸氢二钠( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ )等,均为分析纯,并且使用超纯水配制. 所有实验均在室温下进行.

表 1 污水处理厂二级出水水质特征

Table 1 Water quality of WWTP effluent

DOC / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	UV <sub>254</sub> / $\text{cm}^{-1}$	色度 /c. u.	pH	碱度 / $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$ / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{NO}_2^- \text{-N}$ / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
$7.023 \pm 1.022$	$0.138 \pm 0.015$	$1.60 \pm 0.05$	$7.58 \pm 0.25$	$4.511 \pm 0.241$	$0.178 \pm 0.015$	—

1) “—”表示浓度很低,可以忽略不计

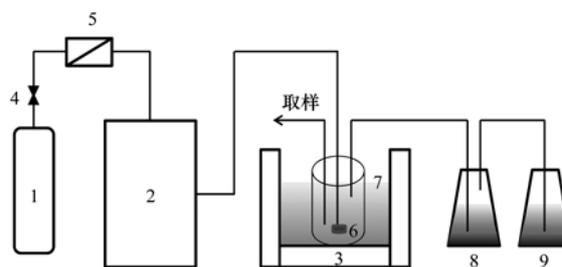
### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 臭氧原液制备方法

采用图 1 所示装置制备臭氧原液,取样瓶有效体积为 500 mL,用磷酸调 pH 至 3. 通过气体流量计控制氧气源臭氧发生器(SK-CFQ-3P,三康)出口流量在  $16 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$  左右,持续曝气约 2 h,未反应的剩余气体通入两级 KI 吸收瓶处理. 整个制备装置利用水浴调节控制温度在  $0 \sim 4^\circ\text{C}$  左右,在波长 258 nm 下测定吸光度值计算得到臭氧原液浓度 [ $\epsilon_{258} = 3\,000 \text{ L} \cdot (\text{mol} \cdot \text{cm})^{-1}$ ],其浓度可达到  $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  左右.

#### 1.2.2 混凝实验

混凝装置采用混凝搅拌器(3000-6N,武汉梅宇),水样体积为 500 mL,使用  $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaOH 溶液和磷酸调节水样 pH 至 5 和 7,加入  $2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$



1. 氧气瓶; 2. 氧气源臭氧发生器; 3. 超低温冷却循环泵;  
4. 阀门; 5. 流量计; 6. 曝气头; 7. 取样瓶;  
8. 一级 KI 吸收瓶; 9. 二级 KI 吸收瓶

图 1 臭氧水制备装置示意

Fig. 1 Ozone stock solution preparation device

磷酸盐缓冲液分别控制 pH 在  $5 \pm 0.5$  和  $7 \pm 0.5$  附近,选择混凝剂  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  进行实验. 混凝条件为  $300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  快搅 1 min,  $60 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  慢搅 30 min,结束后静置沉淀 30 min,并于液面下 2 cm 处取上清液

过滤后测 DOC、UV<sub>254</sub> 和色度等水质指标。

### 1.2.3 臭氧-混凝耦合实验

该实验要求臭氧化过程与混凝过程同时发生,即在混凝实验快搅完成后迅速加入臭氧原液进行慢搅,实验结束后静置、取样测定相关水质指标。在反应过程中按照设定好的时间间隔取样,测定液态臭氧浓度。测定 *p*-CBA 浓度时还需提前向烧杯中加入 0.5 μmol·L<sup>-1</sup> 的 *p*-CBA,并在取样瓶中加入 0.025 mol·L<sup>-1</sup> 硫代硫酸钠淬灭·OH,防止其进一步氧化。

### 1.3 分析测定方法

本实验涉及的测定项目主要包括 pH、色度、UV<sub>254</sub>、DOC、IOD、液态臭氧浓度、·OH 浓度和 *p*-CBA 浓度等。其中 pH 采用上海大普 PHS-3C 型精密酸度计测定;色度用分光光度铂钴比色法<sup>[27]</sup>测定;UV<sub>254</sub> 采用 UV-2102C 型紫外分光光度计在 254 nm 下测定吸光度值;DOC 采用日本岛津生产的 TOC-VCPH 分析仪测定,测定前先用硫酸对水样进行酸化氮吹处理,除去水中无机碳保证测定值的准确性;·OH 浓度通过探针法间接测定,选择 *p*-CBA 作为·OH 的指示剂,主要因为 *p*-CBA 与臭氧的反应速率很慢 [ $k_{O_3} < 1 \text{ L} \cdot (\text{mol} \cdot \text{s})^{-1}$ ],可以忽略,而与·OH 的反应速率很快 [ $k_{\cdot\text{OH}/p\text{-CBA}} = 5 \times 10^9 \text{ L} \cdot (\text{mol} \cdot \text{s})^{-1}$ ]<sup>[28]</sup>; *p*-CBA 浓度采用日本岛津公司生产的 LC-2010AHF 型高效液相色谱(HPLC)测定,流动相为乙腈:水 = 1:1(磷酸调 pH 为 2),流速 1.0 mL·min<sup>-1</sup>,进样量 20 μL,紫外检测波长为 234 nm,柱温 40℃,最低检测限为 0.1 μg·L<sup>-1</sup><sup>[29]</sup>;液态臭氧浓度使用靛蓝比色法<sup>[30]</sup>测定;臭氧在水体中分解的最初 15 s 阶段称为瞬时臭氧需求量(instantaneous O<sub>3</sub> demand, IOD),可以通过计算最初投加臭氧浓度与 15 s 后剩余臭氧浓度的差值得<sup>[31,32]</sup>。碱度、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 的测定参考文献<sup>[33]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 臭氧-混凝耦合工艺深度处理特性研究

比较臭氧投加量(以 O<sub>3</sub>/DOC 计,下同)为 1.0 mg·mg<sup>-1</sup> 时臭氧-混凝耦合工艺与预臭氧-混凝工艺及传统混凝工艺的处理效果,结果如图 2 所示。耦合工艺和预臭氧-混凝工艺相比于传统混凝工艺,其色度、DOC 和 UV<sub>254</sub> 的去除率都有明显的提高。其中色度的去除效果最明显,而 UV<sub>254</sub> 的去除率差异较小,这可能是因为臭氧化过程中臭氧与有机物中的不饱和官能团和共轭结构反应,改变了原水中有机物的性质和分子结构<sup>[34~36]</sup>,从而达到提高混凝效果

的目的。

预臭氧-混凝工艺对 DOC 的去除是有限的,在两种 pH 条件下 DOC 的去除率均小于 20%。Singer 等<sup>[37]</sup>研究表明,在臭氧投加量为 1.0 mg·mg<sup>-1</sup> 时,预臭氧化对混凝去除 DOC 的促进作用是很小的。Selcuk 等<sup>[38]</sup>研究也表明,采用铝盐混凝剂时,预臭氧化对于 TOC 的去除率仅为 22% 左右。但是,在本研究中,不同 pH 条件下耦合工艺对 DOC 的去除率最大,分别为 37.96% (pH = 5) 和 39.66% (pH = 7)。这表明耦合工艺可以提高臭氧化对混凝工艺促进效果的提升。

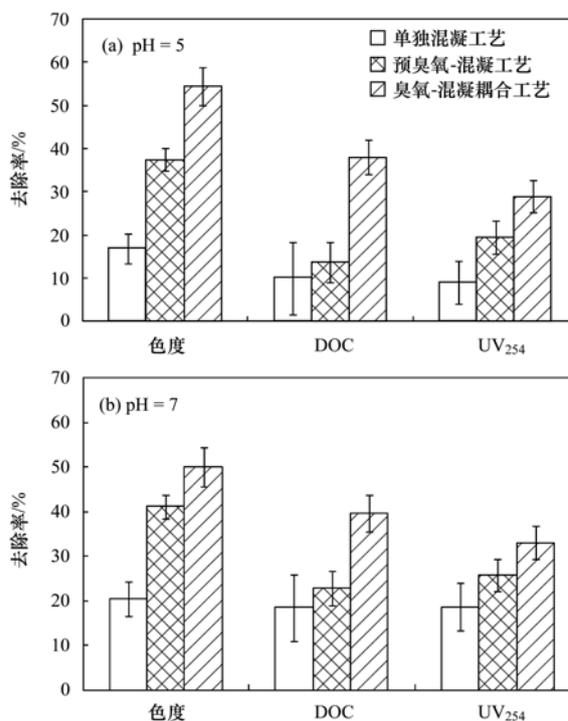


图 2 不同工艺去除效果对比

Fig. 2 Comparison of the removal efficiency in different processes

### 2.2 臭氧-混凝耦合工艺中臭氧自分解反应的影响

为探究混凝过程对臭氧衰减的促进作用,选择混凝剂 AlCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O 和两种 pH 进行实验。由图 3 可以看出,随着 pH 的增加臭氧衰减速度加快。加入的混凝剂与臭氧接触会显著加快臭氧的消耗,这可能是由于混凝剂中的金属离子在一定程度上对臭氧起到了催化氧化的作用,使其分解产生更多氧化性更强的·OH,加速了臭氧的衰减。臭氧在水中的分解是由于臭氧与水中的氢氧根(OH<sup>-</sup>)反应<sup>[39]</sup>,导致超氧自由基(·O<sup>2-</sup>)的形成,随后引发链式反应产生·OH<sup>[40]</sup>。因此,pH 越大,臭氧衰减速度越快。

为了验证加入混凝剂促进了·OH 的产生,又向反应体系中加入叔丁醇。叔丁醇作为·OH 的抑制

剂,可以阻断 $\cdot\text{OH}$ 链式反应的进行<sup>[41]</sup>. 结果显示加入叔丁醇后臭氧的衰减速度明显减慢,说明耦合工艺中臭氧是通过 $\cdot\text{OH}$ 的链式反应而分解的<sup>[42]</sup>.

根据图 3 数据,计算无叔丁醇条件下各反应的 IOD 如表 2 所示. 在相同的臭氧投加量下,高的 pH 值会导致高的 IOD 值. pH = 7 时 IOD 阶段消耗了大约 61.93% 的臭氧,而 pH = 5 时仅消耗臭氧 42.86%. 在相同的 pH 条件下,加入混凝剂后 IOD 值增加,说明耦合工艺中混凝剂水解产生的金属离子或某些化合物不仅促进了 IOD 阶段臭氧的分解,而且也促进了臭氧分解第二阶段时臭氧的衰减速度,增强了 $\cdot\text{OH}$ 的产率. 根据 Buffle 等<sup>[43,44]</sup>的研究结果,在 IOD 阶段,臭氧具有高的分解速率,同时产生大量 $\cdot\text{OH}$ . 而臭氧与二级出水中溶解性有机物的某些特殊结构反应可能是引起臭氧在 IOD 阶段快速衰减的主要原因<sup>[45]</sup>,这可以解释臭氧在二级出水中快速分解的现象.

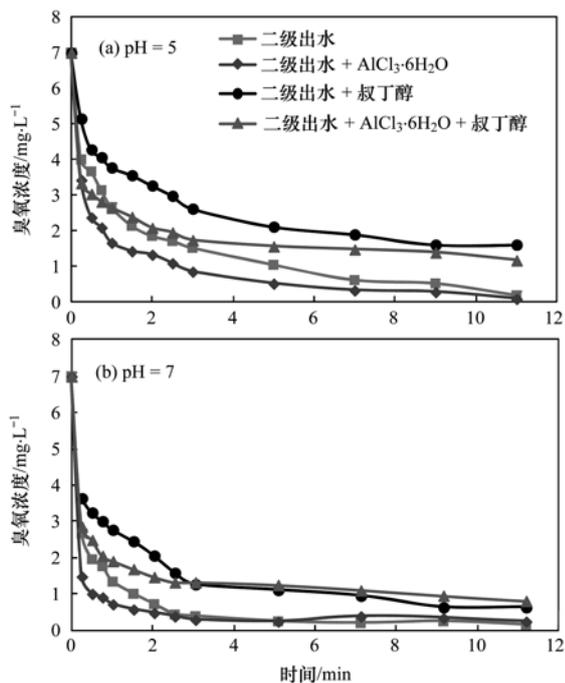


图 3 不同 pH 条件的臭氧衰减曲线

Fig. 3 Ozone depletion curves at different pH values

### 2.3 臭氧-混凝耦合工艺机制研究

*p*-CBA 的去除效果可以间接反映 $\cdot\text{OH}$ 的产生情况. 图 4 反映了加入叔丁醇和不加叔丁醇两种情况下 *p*-CBA 的去除情况. 可以看出加入的叔丁醇明显降低了 *p*-CBA 的去除效率,说明产生的大部分 $\cdot\text{OH}$ 被叔丁醇抑制了<sup>[46]</sup>. 随着 pH 的升高,*p*-CBA 的去除效率逐渐增大,说明产生了较多的 $\cdot\text{OH}$ . 已有研究<sup>[47,48]</sup>也证明高的 pH 可以促进臭氧反应产生更多

的 $\cdot\text{OH}$ . 加入混凝剂可以提高 *p*-CBA 的去除效率,这意味着混凝剂和臭氧发生催化氧化产生了更多的 $\cdot\text{OH}$ . 在 IOD 阶段( $t < 15\text{s}$ ),*p*-CBA 出现了明显的减少,去除率在 26% ~ 40% 之间,说明大量的 $\cdot\text{OH}$ 产生在这一阶段,特别在较高的 pH 条件时. 大量的研究<sup>[43,44,49]</sup>均证明 IOD 阶段 $\cdot\text{OH}$ 的暴露量较高,并且迅速与有机物反应而被消耗.

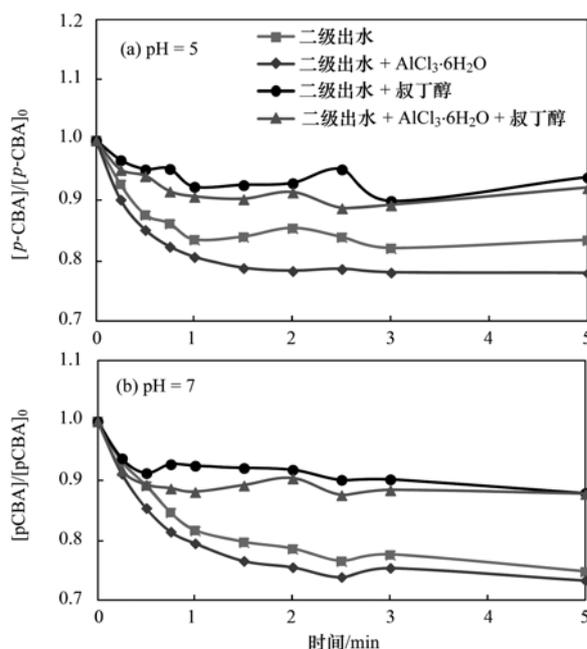


图 4 不同 pH 条件对氯苯甲酸的去除曲线

Fig. 4 The *p*-CBA decomposition curves at different pH values

上述研究表明耦合工艺中存在 $\cdot\text{OH}$ ,为了进一步探究反应特性,引入参数  $R_{ct}$  表示 $\cdot\text{OH}$ 暴露量与臭氧暴露量的比值<sup>[28]</sup>,即  $\int[\cdot\text{OH}]dt/\int[\text{O}_3]dt$ . 臭氧在 IOD( $t < 15\text{s}$ )阶段的分解速率较快,不服从一级动力学方程, $R_{ct}$ 值以指数形式增大;臭氧分解第二阶段服从一级动力学方程<sup>[43-45,49]</sup>,并且  $R_{ct}$ 值保持相对稳定,因此利用  $R_{ct}$  表征臭氧分解第二阶段的反应特性<sup>[42]</sup>. 根据 Elovitz 等<sup>[28]</sup>提出的模型,以  $\ln([p\text{-CBA}]/[p\text{-CBA}]_0)$  为纵坐标,以  $\int[\text{O}_3]dt$  为横坐标进行线性拟合确定  $R_{ct}$  如表 2 所示. 计算所得  $R_{ct}$  的数量级为  $10^{-8} \sim 10^{-9}$ ,这与 Rosenfeldt 等<sup>[47]</sup>的研究结果一致,在 pH = 8 的自然水体中  $R_{ct}$  的数量级在  $10^{-8} \sim 10^{-9}$  之间. 较高的 pH 更有利于臭氧分解产生 $\cdot\text{OH}$ <sup>[46]</sup>,这也导致 pH = 7 时的  $R_{ct}$  值比 pH = 5 时高. 此外,加入混凝剂也引起  $R_{ct}$  值的升高.

根据  $R_{ct}$  值(表 2)和臭氧衰减曲线(图 3)计算 $\cdot\text{OH}$ 的暴露量如图 5 所示,其直观地表现出 pH 越高

表 2 不同实验条件下的 IOD 和  $R_{ct}$ Table 2 Summary of IOD and  $R_{ct}$  under different testing conditions

pH	IOD/mg·L <sup>-1</sup>		$R_{ct} \times 10^{-8}$	
	二级出水	二级出水 + AlCl <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O	二级出水	二级出水 + AlCl <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O
5	3.000	4.857	0.469	0.697
7	4.333	5.762	1.449	2.859

产生的·OH越多,这与之前的讨论结果一致. 加入混凝剂会表现出更高的·OH暴露量, Qi 等<sup>[50,51]</sup>研究发现金属盐混凝剂表面的羧基官能团是一类活性基团,臭氧可以通过静电吸附和氢键结合作用力在水溶液中与羟基反应,引发臭氧分解,再通过链式反应形成·OH. 本研究中,铝系混凝剂通过水合作用在表面形成大量羟基官能团<sup>[52]</sup>,使得臭氧不仅可以直接与水中的 OH<sup>-</sup> 反应引发链式反应生成·OH,还可以与混凝剂表面的羟基反应,产生大量·OH. 因此臭氧-混凝耦合工艺中混凝剂对臭氧的促进作用主要是通过促进臭氧分解产生·OH实现的.

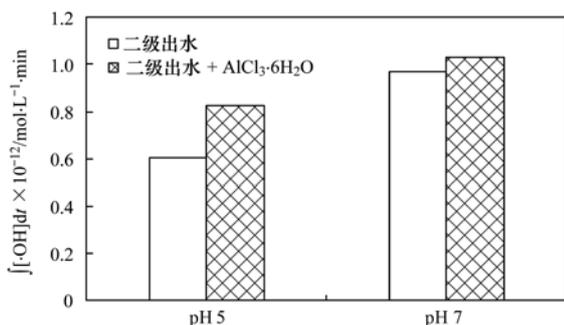


图 5 不同 pH 条件下·OH的暴露量

Fig. 5 The ·OH exposure at different pH values

### 3 结论

(1) 臭氧-混凝耦合工艺有别于传统意义上的预臭氧-混凝工艺,预臭氧化和混凝在一个单元内同时进行,在一个系统中具有互混性.

(2) 臭氧-混凝耦合工艺相比于传统的预臭氧-混凝工艺,对色度、UV<sub>254</sub>和DOC有较好的去除效果. 在不同pH条件下,AlCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O作为混凝剂时,耦合工艺对DOC的去除率均高于30%,说明耦合工艺能够有效提高溶解性有机物的去除效率.

(3) 臭氧-混凝耦合工艺中混凝剂对臭氧化的促进机制主要是通过金属盐混凝剂及其水解产物作为臭氧化的催化剂,引发链式反应,促进臭氧分解产生氧化性更强、选择性更低的·OH,形成高级氧化机制,从而进一步氧化有机污染物.

#### 参考文献:

[1] Zwiener C, Frimmel F H. Oxidative treatment of pharmaceuticals

in water[J]. Water Research, 2000, 34(6): 1881-1885.

[2] Audenaert W T M, Vandierendonck D, Van Hulle S W H, et al. Comparison of ozone and HO· induced conversion of effluent organic matter (EfOM) using ozonation and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> treatment [J]. Water Research, 2013, 47(7): 2387-2398.

[3] 王东升, 刘海龙, 晏明全, 等. 强化混凝与优化混凝: 必要性、研究进展和发展方向[J]. 环境科学学报, 2006, 26(4): 544-551.

Wang D S, Liu H L, Yan M Q, et al. Enhanced coagulation vs. optimized coagulation: a critical review [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(4): 544-551.

[4] 李晓玲, 刘锐, 兰亚琼, 等. J市饮用水氯消毒副产物分析及其健康风险评价[J]. 环境科学, 2013, 34(9): 3474-3479.

Li X L, Liu R, Lan Y Q, et al. Study on chlorinated disinfection byproducts and the relevant health risk in tap water of J city[J]. Environmental Science, 2013, 34(9): 3474-3479.

[5] Krasner S W, Westerhoff P, Chen B Y, et al. Occurrence of disinfection byproducts in United States wastewater treatment plant effluents[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(21): 8320-8325.

[6] 曹飞, 袁守军, 张梦涛, 等. 臭氧氧化水溶液中对乙酰氨基酚的机制研究[J]. 环境科学, 2014, 35(11): 4185-4191.

Cao F, Yuan S J, Zhang M T, et al. Impact factors and degradation mechanism for the ozonation of acetaminophen in aqueous solution [J]. Environmental Science, 2014, 35(11): 4185-4191.

[7] 郑晓英, 王俭龙, 李鑫玮, 等. 臭氧氧化深度处理二级出水的研究[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.

[8] Lin C K, Tsai T Y, Liu J C, et al. Enhanced biodegradation of petrochemical wastewater using ozonation and bac advanced treatment system[J]. Water Research, 2001, 35(3): 699-704.

[9] Sadrnourmohamadi M, Gorczyca B. Effects of ozone as a stand-alone and coagulation-aid treatment on the reduction of trihalomethanes precursors from high DOC and hardness water [J]. Water Research, 2015, 73: 171-180.

[10] 刘海龙, 杨栋, 赵智勇, 等. 高藻原水预臭氧强化混凝除藻特性研究[J]. 环境科学, 2009, 30(7): 1914-1919.

Liu H L, Yang D, Zhao Z Y, et al. Algae removal of high algae raw water by coagulation enhanced by ozonation [J]. Environmental Science, 2009, 30(7): 1914-1919.

[11] Farvardin M R, Collins A G. Preozonation as an aid in the coagulation of humic substances—optimum preozonation dose [J]. Water Research, 1989, 23(3): 307-316.

[12] 刘海龙, 王东升, 王敏, 等. 臭氧对有机物混凝的影响[J]. 环境科学, 2006, 27(3): 456-460.

Liu H L, Wang D S, Wang M, et al. Effects of pre-ozonation on

- organic matter coagulation[J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(3): 456-460.
- [13] Bose P, Reckhow D A. The effect of ozonation on natural organic matter removal by alum coagulation[J]. *Water Research*, 2007, **41**(7): 1516-1524.
- [14] Liu H L, Cheng F Q, Wang D S. Interaction of ozone and organic matter in coagulation with inorganic polymer flocculant-PACl: role of organic components[J]. *Desalination*, 2009, **249**(2): 596-601.
- [15] Chang S D, Singer P C. The impact of ozonation on particle stability and the removal of TOC and THM precursors [J]. *Journal-American Water Works Association*, 1991, **83**(3): 71-79.
- [16] Yan M Q, Wang D S, Shi B Y, *et al.* Effect of pre-ozonation on optimized coagulation of a typical North-China source water[J]. *Chemosphere*, 2007, **69**(11): 1695-1702.
- [17] Liu H L, Wang D S, Wang M, *et al.* Effect of pre-ozonation on coagulation with IPF-PACIs: role of coagulant speciation [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2007, **294**(1-3): 111-116.
- [18] Hoigné J, Bader H. Rate constants of reactions of ozone with organic and inorganic compounds in water—I: non-dissociating organic compounds[J]. *Water Research*, 1983, **17**(2): 173-183.
- [19] Hoigné J, Bader H. Rate constants of reactions of ozone with organic and inorganic compounds in water—II: dissociating organic compounds[J]. *Water Research*, 1983, **17**(2): 185-194.
- [20] Haag W R, Yao C C D. Rate constants for reaction of hydroxyl radicals with several drinking water contaminants [J]. *Environmental Science & Technology*, 1992, **26**(5): 1005-1013.
- [21] Yong E L, Lin Y P. Kinetics of natural organic matter as the initiator, promoter, and inhibitor, and their influences on the removal of ibuprofen in ozonation [J]. *Ozone: Science & Engineering*, 2013, **35**(6): 472-481.
- [22] Ghazi N M, Lastra A A, Watts M J. Hydroxyl radical ( $\cdot\text{OH}$ ) scavenging in young and mature landfill leachates [J]. *Water Research*, 2014, **56**: 148-155.
- [23] Staehelin J, Hoigné J. Decomposition of ozone in water in the presence of organic solutes acting as promoters and inhibitors of radical chain reactions [J]. *Environmental Science & Technology*, 1985, **19**(12): 1206-1213.
- [24] Kasprzyk-Hordern B, Ziółek M, Nawrocki J. Catalytic ozonation and methods of enhancing molecular ozone reactions in water treatment[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2003, **46**(4): 639-669.
- [25] 李华, 王文东, 王晓昌, 等. 臭氧-紫外预处理对高有机物原水混凝效果的影响[J]. *环境科学*, 2010, **31**(8): 1807-1812.
- Li H, Wang W D, Wang X C, *et al.* Effect of ozone-UV pretreatment on coagulation of raw water with high organic matter [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(8): 1807-1812.
- [26] 吴国枝, 吴纯德, 张捷鑫, 等. 超声、臭氧、光催化及其组合工艺处理苯酚废水[J]. *工业用水与废水*, 2007, **38**(5): 38-41.
- Wu G Z, Wu C D, Zhang J X, *et al.* Treatment of phenol-containing wastewater by ultrasound, ozone, photocatalysis and combined process[J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2007, **38**(5): 38-41.
- [27] 曾凡亮, 罗先桃. 分光光度法测定水样的色度[J]. *工业水处理*, 2006, **26**(9): 69-72, 77.
- Zeng F L, Luo X T. Determination of the colority of water samples by spectrophotometry[J]. *Industrial Water Treatment*, 2006, **26**(9): 69-72, 77.
- [28] Elovitz M S, Von Gunten U. Hydroxyl radical/ozone ratios during ozonation processes. I. The  $R_{ct}$  concept [J]. *Ozone: Science & Engineering*, 1999, **21**(3): 239-260.
- [29] Vanderford B J, Rosario-Ortiz F L, Snyder S A. Analysis of *p*-chlorobenzoic acid in water by liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Journal of Chromatography A*, 2007, **1164**(1-2): 219-223.
- [30] Bader H, Hoigné J. Determination of ozone in water by the indigo method[J]. *Water Research*, 1981, **15**(4): 449-456.
- [31] Wert E C, Gonzales S, Dong M M, *et al.* Evaluation of enhanced coagulation pretreatment to improve ozone oxidation efficiency in wastewater [J]. *Water Research*, 2011, **45**(16): 5191-5199.
- [32] Wert E C, Rosario-Ortiz F L, Snyder S A. Effect of ozone exposure on the oxidation of trace organic contaminants in wastewater [J]. *Water Research*, 2009, **43**(4): 1005-1014.
- [33] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [34] 熊平, 梁宏, 林海波. 污水处理技术的研究进展[J]. *四川理工学院学报(自然科学版)*, 2007, **20**(5): 84-87.
- Xiong P, Liang H, Lin H B. Progress in the wastewater treatment processes [J]. *Journal of Sichuan University of Science & Engineering (Natural Science Edition)*, 2007, **20**(5): 84-87.
- [35] Zhang T, Lu J F, Ma J, *et al.* Comparative study of ozonation and synthetic goethite-catalyzed ozonation of individual NOM fractions isolated and fractionated from a filtered river water [J]. *Water Research*, 2008, **42**(6-7): 1563-1570.
- [36] Chiang P C, Chang E E, Chang P C, *et al.* Effects of pre-ozonation on the removal of THM precursors by coagulation [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(21): 5735-5742.
- [37] Singer P C, Arlotta C, Snider-Sajdak N, *et al.* Effectiveness of pre-and intermediate ozonation on the enhanced coagulation of disinfection by-product precursors in drinking water [J]. *Ozone: Science & Engineering*, 2003, **25**(6): 453-471.
- [38] Selcuk H, Rizzo L, Nikolaou A N, *et al.* DBPs formation and toxicity monitoring in different origin water treated by ozone and alum/PAC coagulation [J]. *Desalination*, 2007, **210**(1-3): 31-43.
- [39] Alder M G, Hill G R. The kinetics and mechanism of hydroxide ion catalyzed ozone decomposition in aqueous solution [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1950, **72**(5): 1884-1886.
- [40] Buhler R, Staehelin J, Hoigné J. Ozone decomposition in water studied by pulse radiolysis I.  $\text{HO}_2/\text{O}_2^-$  and  $\text{HO}_3/\text{O}_3^-$  as intermediates-Correction [J]. *Journal of Physical Chemistry*, 1984, **88**(22): 5450.
- [41] Huang X F, Li X C, Pan B C, *et al.* Self-enhanced ozonation of benzoic acid at acidic pHs [J]. *Water Research*, 2015, **73**: 9-16.

- [42] Yong E L, Lin Y P. Incorporation of initiation, promotion and inhibition in the  $R_{ct}$  concept and its application in determining the initiation and inhibition capacities of natural water in ozonation [J]. *Water Research*, 2012, **46**(6): 1990-1998.
- [43] Buffle M O, Schumacher J, Salhi E, *et al.* Measurement of the initial phase of ozone decomposition in water and wastewater by means of a continuous quench-flow system; application to disinfection and pharmaceutical oxidation[J]. *Water Research*, 2006, **40**(9): 1884-1894.
- [44] Buffle M O, Von Gunten U. Phenols and amine induced HO $\cdot$  generation during the initial phase of natural water ozonation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(9): 3057-3063.
- [45] Buffle M O, Schumacher J, Meylan S, *et al.* Ozonation and advanced oxidation of wastewater; effect of O $_3$  dose, pH, DOM and HO $\cdot$ -Scavengers on ozone decomposition and HO $\cdot$  generation[J]. *Ozone: Science & Engineering*, 2006, **28**(4): 247-259.
- [46] Staehelin J, Hoigné J. Decomposition of ozone in water; rate of initiation by hydroxide ions and hydrogen peroxide [J]. *Environmental Science & Technology*, 1982, **16**(10): 676-681.
- [47] Rosenfeldt E J, Linden K G, Canonica S, *et al.* Comparison of the efficiency of  $\cdot$ OH radical formation during ozonation and the advanced oxidation processes O $_3$ /H $_2$ O $_2$  and UV/H $_2$ O $_2$  [J]. *Water Research*, 2006, **40**(20): 3695-3704.
- [48] Park J S, Choi H, Cho J. Kinetic decomposition of ozone and para-chlorobenzoic acid (*p*-CBA) during catalytic ozonation[J]. *Water Research*, 2004, **38**(9): 2285-2292.
- [49] Wert E C, Rosario-Ortiz F L, Drury D D, *et al.* Formation of oxidation byproducts from ozonation of wastewater [J]. *Water Research*, 2007, **41**(7): 1481-1490.
- [50] Qi F, Chen Z L, Xu B B, *et al.* Influence of surface texture and acid-base properties on ozone decomposition catalyzed by aluminum (hydroxyl) oxides [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2008, **84**(3-4): 684-690.
- [51] Qi F, Xu B B, Chen Z L, *et al.* Mechanism investigation of catalyzed ozonation of 2-methylisoborneol in drinking water over aluminum (hydroxyl) oxides; role of surface hydroxyl group[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, **165**(2): 490-499.
- [52] Duan J M, Gregory J. Coagulation by hydrolysing metal salts [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2003, **100-102**: 475-502.

## CONTENTS

Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Particulate Matter and Lead in Urban Beijing .....	YAO Li, LIU Jin, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> ( 423 )
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> and Their Human Health Risks Among the Coastal City Group Along Western Taiwan Straits Region, China .....	CHEN Yan-ting, DU Wen-jiao, CHEN Jin-sheng, <i>et al.</i> ( 429 )
Correlation of Speciated Mercury with Carbonaceous Components in Atmospheric PM <sub>2.5</sub> in Shengsi Region .....	CHENG Na, QIAN Guan-lei, DUAN Lian, <i>et al.</i> ( 438 )
Compositions and Sources of Summertime Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM <sub>2.5</sub> from Mt. Taishan .....	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, LIU Xiao-di, <i>et al.</i> ( 445 )
Variation Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Atmosphere of Northern Suburb of Nanjing .....	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jian-yu, <i>et al.</i> ( 453 )
Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from Anthropogenic Source in Chang-Zhu-Tan Region .....	YOU Xiang-yu, LUO Da-tong, LIU Zhan, <i>et al.</i> ( 461 )
Characteristics of Methane Emission from Urban Traffic in Nanjing .....	ZHANG Xue, HU Ning, LIU Shou-dong, <i>et al.</i> ( 469 )
Variations in Aerosol Optical Depth over Three Northeastern Provinces of China, in 2003-2014 .....	ZHANG Chen-he, ZHAO Tian-liang, WANG Fu, <i>et al.</i> ( 476 )
Variation Analysis of Daily PM <sub>2.5</sub> Concentrations Based on Boosted Regression Tree: A Case Study in Changzhou .....	GE Yue, WANG Ming-xin, SUN Xiang-wu, <i>et al.</i> ( 485 )
Characteristics of Mercury Emissions from Coal-fired Power Plants in Chongqing .....	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> ( 495 )
Possible Sources of PCDD/Fs in Atmosphere of a Certain District in Guangdong .....	FU Jian-ping, HAN Jing-lei, YU Xiao-wei, <i>et al.</i> ( 502 )
Sources and Pollution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Conditional Pathogenic Bacteria in Concentrated Poultry Feeding Operations .....	GAO Min, QIU Tian-lei, QIN Yu-cheng, <i>et al.</i> ( 510 )
Distribution and Burial Characteristics of Nitrogen Forms in Sediment of Dianchi Lake During Last Century .....	WU Ya-lin, LI Shuai-dong, JIANG Jun-wu, <i>et al.</i> ( 517 )
Temporal and Spatial Variations of Dissolved Inorganic Carbon and Its Stable Isotopic Composition in the Surface Stream of Karst Groundwater Recharge .....	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> ( 527 )
Succession Pattern of Phytoplankton of Daning River in the Three Gorges Reservoir and Its Driving Factors .....	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU De-fu, <i>et al.</i> ( 535 )
Response of the Water Quality of a Stratified Reservoir to an Extreme El Niño Event During Summer .....	QIU Xiao-peng, HUANG Ting-lin, ZENG Ming-zheng, <i>et al.</i> ( 547 )
Effect of Coupling Process of Wetting-Drying Cycles and Seasonal Temperature Increasing on Sediment Nitrogen Minerization in the Water Level Fluctuating Zone .....	LIN Jun-jie, LIU Dan, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> ( 555 )
Photo-induced Phosphate Release from Organic Phosphorus Decomposition Driven by Fe(III)-oxalate Complex in Lake Water .....	JIANG Yong-can, PENG Yun-xiao, LIU Guang-long, <i>et al.</i> ( 563 )
Preparation and Phosphorus Removal Mechanism of Highly Efficient Phosphorus Adsorbent Mg/Al-LDO .....	WANG Wei-dong, HAO Rui-xia, ZHANG Xiao-xian, <i>et al.</i> ( 572 )
Efficiency and Mechanism of Nitrogen and Phosphorus Removal in Modified Zeolite Wetland .....	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Le-zhong, <i>et al.</i> ( 580 )
Repression of Nitrogen and Phosphorus Release from Lakeshore Sediment by Five Littoral-zone Plants .....	YAO Cheng, HU Xiao-zhen, LU Shao-yong, <i>et al.</i> ( 589 )
Simulated Desorption Kinetics of Lead by the Dominant Plant Roots Released Low Molecular Weight Organic Acids from the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir .....	HE Yuan-jie, LIU Jiang, JIANG Tao, <i>et al.</i> ( 600 )
Experimental Research of Hg <sup>2+</sup> Removal by TiO <sub>2</sub> /Bentonite Composite .....	TANG Xing-ping, ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, <i>et al.</i> ( 608 )
Impact of Ammonia and H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> on Bromate and Disinfection By-products Control .....	WANG Yong-jing, DU Xu, JIN Meng, <i>et al.</i> ( 616 )
Influencing Factors of Bacterial Activity in Water Distribution Networks .....	WANG Xiao-dan, ZHAO Xin-hua, <i>et al.</i> ( 622 )
Adsorptive Remediation of Cr(VI) Contaminated Groundwater with Chemically Synthesized Schwertmannite .....	ZHU Li-chao, LIU Yuan-yuan, LI Wei-min, <i>et al.</i> ( 629 )
Characteristics and Mechanism of Hybrid Ozonation-Coagulation Process in Wastewater Reclamation .....	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> ( 640 )
Nitrogen Removal Effect and Conversion Characteristics of Nitrous Oxide in Single-stage and Multi-stage A/O Processes .....	GUO Chang-zi, ZHANG Feng-yan, LIU Fu-yu, <i>et al.</i> ( 647 )
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX with Different Organic Carbon Sources .....	GUAN Yong-jie, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> ( 654 )
Operational Performance and Microbial Community Structure in a Completely Mixed Aeration System .....	WANG Shuo, XU Qiao, ZHANG Guang-sheng, <i>et al.</i> ( 665 )
Start-up of Combined Floc-granule CANON Process and the Effects of SRT on Reactor Performance .....	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> ( 672 )
Effects of Free Ammonia Regulation on the Performance of High Solid Anaerobic Digesters with Dewatered Sludge .....	DAI Xiao-hu, HE Jin, YAN Han, <i>et al.</i> ( 679 )
Highly Efficient Bioflocculation of Microalgae Using <i>Mucor circinelloides</i> .....	GU Qiong, JIN Wen-biao, CHEN Yuan-qing, <i>et al.</i> ( 688 )
Effect of Zero Valent Iron on the Decline of Tetracycline Resistance Genes and Class 1 Integrons During Thermophilic Anaerobic Digestion of Sludge .....	WEI Xin, XUE Shun-li, YANG Fan, <i>et al.</i> ( 697 )
Concentration, Sources and Ecological Risks of PAHs of Different Land Use Types in Shenfu New City .....	WANG Jing, LIU Ming-li, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> ( 703 )
Compositions, Sources and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dusts from Driving-schools in a City of Henan Province, China .....	CHEN Yi-nan, MA Jian-hua, DUAN Hai-jing, <i>et al.</i> ( 711 )
Remediation of Decabromodiphenyl Ether Contaminated Sediment Through Plant Roots Enhanced by Exogenous Microbes .....	YANG Lei-feng, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> ( 721 )
Impacts of Bioremediation on Microbial Communities and Different Forms of Nitrogen in Petroleum Contaminated Soil .....	YE Xi-qiong, WU Man-li, CHEN Kai-li, <i>et al.</i> ( 728 )
Effects of <i>Rhodospseudomonas palustris</i> PSB06 on Pepper Rhizosphere Microbial Community Structure .....	LUO Lu-yun, JIN De-cai, ZUO Hui, <i>et al.</i> ( 735 )
Effect of Reclaimed Water on Bacterial Community Composition and Function in Urban River Sediment .....	DI Yan-ming, WANG Guang-xuan, HUANG Xing-ru, <i>et al.</i> ( 743 )
Effects of Different Vegetation Types and Reclamation Years on Soil Bacterial Community Structure in Reclaimed Mine Areas .....	HE Long, LI Yan-qin, LI Bin-chun, <i>et al.</i> ( 752 )
Characteristic of Abundances and Diversity of Carbon Dioxide Fixation Microbes in Paddy Soils .....	LIU Qiong, WEI Xiao-meng, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> ( 760 )
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components: Influence on the Composition and Properties of Humic Substances .....	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> ( 769 )
Straw Composts with Composite Inoculants and Their Effects on Soil Carbon and Nitrogen Contents and Enzyme Activity .....	NIE Wen-han, QI Zhi-ping, FENG Hai-wei, <i>et al.</i> ( 783 )
Comparative Analysis on Effect of Wheat Straw and Its Biochar Amendment on Net Global Warming Potential Under Wheat-Maize Rotation Ecosystem in the Guanzhong Plain .....	CHENG Gong, CHEN Jing, LIU Jing-jing, <i>et al.</i> ( 792 )
Isolation and Identification of a Chlorobenzene-degrading Bacterium and Its Degradation Characteristics .....	YE Jie-xu, LIN Tong-hui, LUO Yu-hao, <i>et al.</i> ( 802 )
Isolation, Identification and Metabolic Characteristics of a Heterotrophic Denitrifying Sulfur Bacterial Strain .....	TAN Wen-bo, MA Xiao-dan, HUANG Cong, <i>et al.</i> ( 809 )
Effects of Continuous Application of Sewage Sludge Compost on Heavy Metals Accumulation and Mobility Characteristics in Soil Profile and on Heavy Metals Uptake of Wheat .....	SUN Na, SHANG He-ping, RU Shu-hua, <i>et al.</i> ( 815 )
Effects of Nitrogen Application on Selenium Uptake, Translocation and Distribution in Winter Wheat .....	CHEN Yu-peng, PENG Qin, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> ( 825 )
Accumulation and Biotransformation in Typical Freshwater Algae Species Influenced by Titanium Dioxide Nanoparticles Under Long-term Exposure .....	LI Jin-li, WANG Zhen-hong, YAN Ya-meng, <i>et al.</i> ( 832 )
Sorption of <i>p</i> -Nitrophenol by Biochars of Corn cob Prepared at Different Pyrolysis Temperatures .....	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei ( 837 )

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明  
赵进才 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)

2017年2月15日 第38卷 第2期

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 2 Feb. 15, 2017

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行

ISSN 0250-3301



9 770250 330172