

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第5期

Vol.37 No.5

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2015年12月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化 薛亦峰,周震,聂滕,潘涛,齐璐,聂磊,王占山,李云婷,李雪峰,田贺忠(1593)

北京 APEC 期间大气颗粒物中类腐殖酸的污染特征及来源 周雪明,仝雪娇,项萍,谭吉华,段菁春,何晓明,贺克斌,马永亮(1602)

利用 SPAMS 分析北京市硫酸盐、硝酸盐和铵盐季节变化特征及潜在源区分布 刘浪,张文杰,杜世勇,侯鲁健,韩斌,杨文,陈敏东,白志鹏(1609)

兰州城区大气 PM_{2.5} 污染特征及来源解析 王新,聂燕,陈红,王博,黄韬,夏敦胜(1619)

成都市西南郊区春季大气 PM_{2.5} 的污染水平及来源解析 林瑜,叶芝祥,杨怀金,张菊,殷蔚雯,李晓芬(1629)

中亚热带背景区重庆四面山大气气态总汞含量变化特征 刘伟明,马明,王定勇,孙涛,魏世强(1639)

固定源排放污染物健康风险评价方法的建立 陈强,吴焕波(1646)

北京市典型燃烧源颗粒物排放水平与特征测试 胡月琪,邬晓东,王琛,梁云平,马召辉(1653)

南京公园降尘中重金属污染水平及风险评价 王呈,钱新,李慧明,孙一轩,王金花(1662)

CoCuMnO₂ 光催化氧化多组分 VOCs 特性及其动力学 孟海龙,卜龙利,刘嘉栋,高波,冯奇奇,谭娜,谢帅(1670)

大辽河感潮河段及近岸河口氮、磷的分布及潜在性富营养化 张雷,曹伟,马迎群,韩超南,秦延文,赵艳民,刘志超,杨晨晨(1677)

典型温冰川区湖泊的稳定同位素空间分布特征 史晓宜,蒲焘,何元庆,陆浩,牛贺文,夏敦胜(1685)

利用 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 示踪北京城区河流硝酸盐来源 赵庆良,马慧雅,任玉芬,王效科,彭剑锋,贺成武,武俊良,刘梦贞,闫苗苗(1692)

柳江盆地浅层地下水硝酸盐分布特征及影响因素分析 王贺,谷洪彪,迟宝明,李海君,姜海宁(1699)

三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响 陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华(1707)

亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究 王迪,李红芳,刘锋,王毅,钟元春,何洋,肖润林,吴金水(1717)

平原河网典型污染物生物降解系数的研究 冯帅,李叙勇,邓建才(1724)

沉水植物对沉积物微生物群落结构影响:以洪泽湖湿地为例 张丁予,章婷曦,董丹萍,李德芳,王国祥(1734)

苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素 任杰,周涛,朱广伟,金颖薇,崔扬,许海,朱梦圆,夏明芳,陈伟民(1742)

河北衡水湖湿地汞污染现状及生态风险评价 王乃姗,张曼胤,崔丽娟,马牧源,颜亮,穆泳林,秦鹏(1754)

顺德水道土壤及沉积物中重金属分布及潜在生态风险评价 蔡怡敏,陈卫平,彭驰,王铁宇,肖荣波(1763)

台州电子垃圾拆解区水和沉积物中多溴联苯醚污染特征与生态风险 陈香平,彭宝琦,吕素平,陈强,张勇,黄长江,董巧香(1771)

乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素 黄奇波,覃小群,刘朋雨,蓝芙宁,张连凯,苏春田(1779)

岩溶流域地下水 TOC 输出及影响因素分析:以重庆丰都雪玉洞地下河流域为例 王巧莲,蒋勇军,陈宇(1788)

广东英德宝晶宫洞穴滴水元素季节变化与影响因素 黄嘉仪,陈琳,陈琼,刘淑华,杨亮,童晓宁,贺海波,米小建,邓肖敏,彭小桃,李汉杰,杨琰,周厚云(1798)

基于 PCR-DGGE 和拟杆菌(*Bacteroides*) 16S rRNA 的岩溶地下水粪便污染源示踪研究:以重庆南山老龙洞地下河系统为例 张弘,蒋勇军,张远瞩,段逸凡,吕现福,贺秋芳(1805)

典型岩溶区地下河中溶解态脂类生物标志物来源解析及其变化特征 梁作兵,孙玉川,李建鸿,王尊波,谢正兰,张媚,廖昱,江泽利(1814)

钴活化过一硫酸盐氧化过程中卤代副产物的生成 刘阔,金浩,董为,季跃飞,陆隽鹤(1823)

天冬氨酸在氯化过程中生成消毒副产物二氯乙腈的研究 丁春生,李乃军,张涛,章梦青(1831)

臭氧氧化饮用水过程中可同化有机碳生成的影响因素 董秉直,张佳丽,何畅(1837)

污水管网典型混流制区域水量水质波动特征解析 程珣,张明凯,刘艳臣,施汉昌(1845)

HDTMA 改性沸石的制备及吸附废水中对硝基苯酚的性能和动力学 郭俊元,王彬(1852)

放射性废水处理中吸附剂的优势藻种筛选 李鑫,胡洪营,余骏一,赵文玉(1858)

微米 Fe₃O₄ 磁粉调理-压力电场污泥脱水工艺过程研究 钱旭,王毅力,赵丽(1864)

间歇曝气 SBR 处理养猪沼液的短程脱氮性能 宋小燕,刘锐,税勇,川岸朋树,占新民,陈吕军(1873)

不同灌溉方式对华北平原冬小麦土壤 CO₂ 和 N₂O 排放通量的影响 郭树芳,齐玉春,尹飞虎,彭琴,董云社,贺云龙,闫钟清(1880)

卫河新乡市区段春季溶解 CH₄ 与 N₂O 浓度特征 侯翠翠,张芳,李英臣,王奇博,刘赛(1891)

模拟氮沉降对内蒙古克氏针茅草原 N₂O 排放的影响 杨涵越,张婷,黄永梅,段雷(1900)

土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制 曹湛波,王磊,李凡,付小花,乐毅全,吴纪华,陆兵,徐殿胜(1908)

黑土丘陵区小流域土壤有机质空间变异及分布格局 高凤杰,马泉来,韩文文,单培明,周军,张少良,张志民,王宏燕(1915)

耕作方式对紫色水稻土团聚体中有机质及重金属的分布特征影响 史琼彬,赵秀兰,常同举,卢吉文(1923)

北京东南郊典型地层重金属分布特征与潜在生态风险 赵倩,马琳,刘翼飞,何江涛,李广贺(1931)

准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析 刘巍,杨建军,汪君,王果,曹月娥(1938)

纳米 TiO₂ 对土壤重金属释放及形态变化的影响 张金洋,王定勇,梁丽,李楚娟,张成,周雄,刘娟(1946)

纳米零价铁铜双金属对铬污染土壤中 Cr(VI) 的还原动力学 马少云,祝方,商执峰(1953)

低分子有机酸对硫杆菌活性的抑制作用及对土壤重金属脱除的影响 宋永伟,王鹤茹,曹艳晓,李飞,崔春红,周立祥(1960)

粒径和包裹物对纳米银在海洋微藻中的毒性影响 黄俊,衣俊,强丽媛,程金平(1968)

萱草修复石油烃污染土壤的根际机制和根系代谢组学分析 王亚男,程立娟,周启星(1978)

高温堆肥过程对猪粪来源抗生素抗性基因的影响 郑宁国,黄南,王卫卫,喻曼,陈晓暘,姚燕来,王卫平,洪春来(1986)

磺胺抗性消长与堆肥进程的交互特征 林辉,汪建妹,孙万春,符建荣,陈红金,马军伟(1993)

《环境科学》征订启事(1830) 《环境科学》征稿简则(1977) 信息(1698,1851,1992)

臭氧氧化饮用水过程中可同化有机碳生成的影响因素

董秉直^{1,2}, 张佳丽¹, 何畅¹

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学长江环境教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 研究臭氧化过程中, 臭氧投加量、pH 值和离子强度对可同化有机碳 (assimilable organic carbon, AOC) 生成量的影响. 结果表明, 臭氧投加量在 1~5 mg·L⁻¹ 范围, AOC 的生成量随着投加量的增加而增加, 但过高的臭氧投加量 (9 mg·L⁻¹) 反而导致 AOC 生成量下降. pH 越高 (6~9), AOC 的生成量也越高. AOC 的生成量随着离子强度的升高而下降. 臭氧氧化强疏组分 AOC 的生成量最高, 其次为弱疏, 而极亲和中亲最低. 研究发现, AOC 的生成量与小分子有机物的 SUVA 有密切的关系, 较低的 SUVA 产生较多的 AOC.

关键词: 生物稳定性; 可同化有机碳; 臭氧氧化; 有机物相对分子质量; 亲疏水组分

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)05-1837-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.2016.05.030

Influencing Factors of Assimilable Organic Carbon (AOC) Formation in Drinking Water During Ozonation Process

DONG Bing-zhi^{1,2}, ZHANG Jia-li¹, HE Chang¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Yangtze River Water Environment, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The influences of ozone dosage, pH and ionic strength on the formation of Assimilable Organic Carbon (AOC) during ozonation were investigated. The result demonstrated that within the range of 1-5 mg·L⁻¹ O₃, the formation of AOC increased with increasing ozone dosage, but higher ozone dosage (9 mg·L⁻¹) resulted in reduction of AOC formation. AOC formation increased with higher pH but decreased with increasing ionic strength. The result also showed that AOC formation with hydrophobic fraction (HPO) was the most, followed by transphilic fraction (TPI), and charged hydrophilic fraction (CHPI), while neutral hydrophilic fraction (NHPI) was the least. It was found that AOC formation related closely with SUVA of small molecular weight organics, and the lower SUVA produced more AOC.

Key words: biological stability; assimilable organic carbon; ozonation; relative molecular weight of organics; hydrophobic/hydrophilic fractions

饮用水中残留的天然有机物 (natural organic matter, NOM) 会引发给水管网中微生物的再生长, 导致饮用水的生物稳定性问题. 可同化有机碳 (assimilable organic carbon, AOC) 代表水中最易被微生物分解利用的有机物, 是评价饮用水生物稳定性的重要指标. 为了提高饮用水水质, 臭氧生物活性炭 (O₃-BAC) 深度处理工艺得到了越来越广泛的应用. 深度处理工艺去除 AOC 的效果和机制在国内得到了深入和广泛的研究^[1~5], 但仍有许多不明之处需要阐述^[6]. 研究报道, 臭氧氧化会造成 AOC 的增加, 这种现象继而造成深度处理出水的 AOC 增加, 从而对管网的生物稳定性造成影响^[7~9]. 一些研究指出, AOC 的生成主要来源于相对分子质量小于 1 000 的有机物, 即小分子有机物是造成 AOC 的主要原因^[10~12]. 但是, 有机物的其它特性是否也与 AOC 的生成有关, 有必要进一步的研究, 但这方面的报道极为有限. Labanowski 等^[13] 研究表明, 地表水的亲水性有机物的 AOC 生成量最大, 从而预示有

有机物的组分也与 AOC 的生成有关. 臭氧氧化将大分子有机物氧化成小分子, 并使有机物更加亲水性, 因而这种有机物相对分子质量以及亲疏水的变化必然影响 AOC 的生成. 由此可以认为, 阐明臭氧过程中的有机物相对分子质量以及亲疏水与 AOC 生成的关系, 通过更深入揭示 AOC 生成机制, 以期为深度处理控制 AOC 提供新的思路.

本研究分析了臭氧氧化过程中的臭氧投加量、pH 值和离子强度对 AOC 生成量以及相对分子质量分布的影响; 同时, 对水样进行亲疏水组分分离, 分别通以臭氧, 探求不同组分经臭氧氧化后生成 AOC 的潜能.

收稿日期: 2015-09-05; 修订日期: 2015-12-25

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07403-001C)

作者简介: 董秉直 (1955~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为饮用水处理理论与技术, E-mail: dbz77@tongji.edu.cn

1 材料与方法

1.1 试验水样

本试验所用原水为苏州东太湖水,试验期间的主要水质见表 1.

表 1 试验的主要水质指标

Table 1 Main water-quality indicators of experimental water			
pH	浊度/NTU	DOC/mg·L ⁻¹	UV ₂₅₄ /cm ⁻¹
8.25	20.3	3.159	0.06

1.2 试验方法

有关细菌培养试验用品均需经无碳化处理, AOC 的测定采用先后接种法; 亲疏水组分分离首先将原水浓缩至 15 mg·L⁻¹ 左右, 再经 0.45 μm 膜滤后, 最后用 XAD-4、XAD-8 树脂以及 IRA-958 型阴离子交换树脂分离富集原水中有机物亲疏水性组分, 并用洗脱液洗脱. TOC 采用日本 Shimadzu 公司 TOC-L 测定仪测定; UV₂₅₄ 采用美国 Hach 公司 DR-5000 紫外分光光度计测定. 相对分子质量分布采用美国 Waters 公司 e2695 高效凝胶色谱仪测定, UV 检测器为 Waters 2489, TOC 检测器为美国 GE 公司 Sievers 900 Turbo. 试验所用超纯水为美国 Milli-pore 公司超纯水机生产.

1.3 臭氧反应装置及试验方法

本试验采用半连续流式反应系统, 反应器为圆柱形(φ40 mm × 600 mm), 体积为 700 mL, 玻璃材质, 底部设有微孔玻璃板, 气孔孔径为 0.5 mm, 顶部为一带出气孔的磨砂玻璃塞(图 1). 臭氧发生器采用德国 ANSEROS 公司生产的 COM-AD-01 型臭氧发生器, 气源为高纯氧, 臭氧浓度可调范围为 0 ~ 100 g·m⁻³, 氧气流量范围 0.2 ~ 2 L·min⁻¹, 臭氧产量百分比(O₃/O₂)控制范围为 0 ~ 100%. 试验时, 将氧气流量调为 0.5 L·min⁻¹, 臭氧产量百分比调为 5%, 产生的臭氧经反应器底部的微孔玻璃板曝气后与水样充分接触、反应, 过程中产生的尾气则由反应器顶部的磨砂出气孔进入两级尾气吸收瓶, 吸收瓶内装有 4% 的碘化钾(KI)溶液.

臭氧投加量的测定: 采用我国住建部发布的标准^[14]中规定的碘量法. 先在反应器内加入 20 mL 20% KI 溶液, 再加入超纯水至 700 mL 刻度处. 在氧气流量、臭氧产量百分比等参数一致的情况下, 向 KI 溶液中通入不同时间的臭氧. 然后用 Na₂S₂O₃ 标准溶液对吸收了臭氧的 KI 溶液进行滴定, 得到 Na₂S₂O₃ 标准溶液的消耗量, 再计算出该时间下的

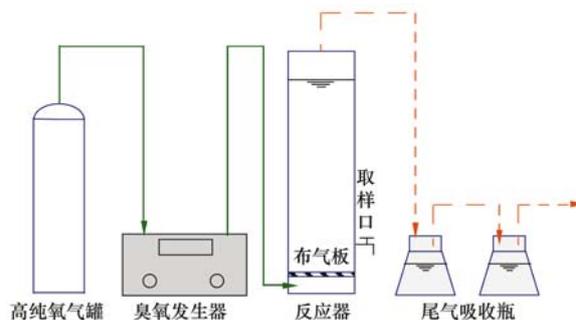


图 1 半连续流臭氧反应装置示意

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus for ozonation of semi-continuous flow

臭氧投加量.

试验水样通入臭氧: 进行每批次试验前都实测臭氧投加量, 以消除试验温度等条件的影响, 从而得到目标投加量所需要的通入时间. 为保证臭氧与水样接触充分, 每次试验向反应器中加入 700 mL 水样. 再根据臭氧投加量试验得到的通入时间, 即认为达到目标臭氧投加量并取样, 且立即用 Na₂S₂O₃ 溶液淬灭水样中臭氧. 本研究数据均为两次试验结果的平均值.

1.4 有机物相对分子质量的分析

相对分子质量分布采用美国 Waters 公司 e2695 高效凝胶色谱仪测定, UV 检测器为 Waters 2489, TOC 检测器为美国 GE 公司 Sievers 900 Turbo^[15].

东太湖水的有机物相对分子质量分布如图 2 所示. 从中可见, 东太湖水的溶解性总有机炭(DOC)为大分子、中分子和小分子的 3 个响应峰, 大分子响应峰的相对分子质量为 8×10^5 , 中分子响应峰的为 5×10^3 , 而小分子的为 1×10^3 ; UV 的凝胶色谱图上没有大分子的响应峰, 这说明大分子完全为亲水性有机物构成, 中分子的响应峰非常强烈, 表明中分子多为疏水性有机物组成, 而小分子的响应微弱, 这与以往的研究结果相似^[16,17]. 为了得出各个相对分子质量的有机物含量, 采用了分峰方法(Peak fitting), 这种方法不仅可以较为精确得到不同相对分子质量有机物的含量, 而且还可计算它们的 SUVA 值, 从而了解不同相对分子质量的亲疏水性^[18-20].

2 结果与讨论

2.1 臭氧氧化过程中臭氧投加量对 AOC 生成量的影响

2.1.1 臭氧投加量对 DOC 和 UV₂₅₄ 降解效果的影响

臭氧投加量去除 DOC 和 UV₂₅₄ 的效果见图 3. 从中可知, 臭氧氧化对 DOC 的去除率在 13.9% ~

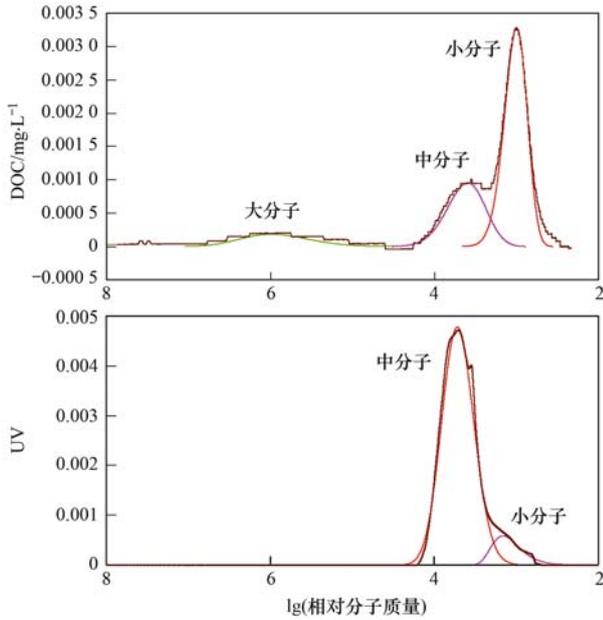


图2 东太湖有机物相对分子质量的分布以及分峰
Fig. 2 Distribution and peak-fitting of the relative molecular weight of organic matter in East Taihu Lake

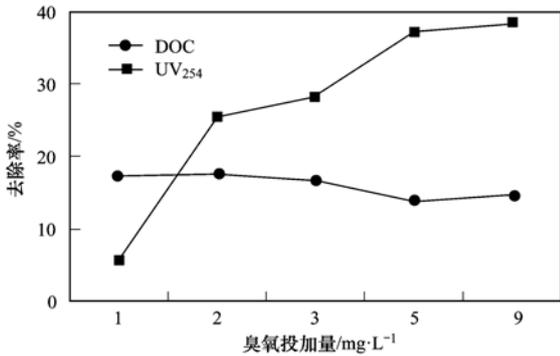


图3 臭氧投加量对氧化过程中 DOC 和 UV₂₅₄降解的影响
Fig. 3 Effects of ozone dose on degradation of DOC and UV₂₅₄ during ozonation

17.7% 之间波动,而 UV₂₅₄ 的去除率随着臭氧投加量的增加而提高.

2.1.2 臭氧投加量对 AOC 生成量的影响

臭氧投加量对 AOC 生成量的影响如图 4 所示. 原水中的 AOC 为 33 μg·L⁻¹,随着臭氧投加量的增加(1 ~ 5 mg·L⁻¹时),AOC 也呈升高趋势. 图 4 表明,原水中的 P17 多于 NOX,但投加臭氧后,NOX 高于 P17. Ramseier 等^[21]的研究表明,臭氧氧化会产生大量的草酸,而草酸很容易为 NOX 所利用. 由此可见,臭氧氧化提高了 NOX 的比例,使之更容易为细菌所利用,从而提高了 AOC 生成量.

2.1.3 臭氧投加量对有机物相对分子质量分布的影响

不同投加量的臭氧氧化后的相对分子质量比例

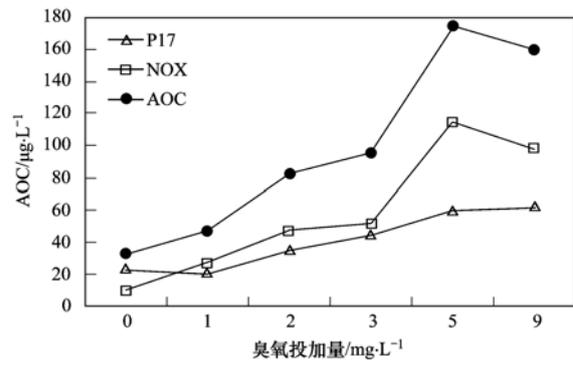


图4 臭氧投加量对氧化过程中 AOC 生成量的影响
Fig. 4 Effects of ozone dose on formation of AOC during ozonation

分布变化如图 5 所示. 当臭氧投加量为 1 ~ 2 mg·L⁻¹时,大分子所占比例下降,而中分子比例略为增加,小分子比例基本保持不变. 但当投加量为 3 mg·L⁻¹时,中分子比例下降,而小分子比例增加. 继续增加臭氧投加量时,这样的模式保持不变.

臭氧氧化对不同相对分子质量的 DOC 分布影响如图 6 所示. 当臭氧投加量在 1 ~ 2 mg·L⁻¹时,所有的相对分子质量区间均呈下降趋势,但臭氧投加量为 3 mg·L⁻¹以上时,中分子有机物明显下降,而小分子略有增加. 这表明仅当臭氧投加量较高时,部分的中分子有机物会氧化成小分子. 通常的认识是臭氧的作用是将大分子氧化成小分子. 但从本研究的结果来看,大分子有机物的含量很低,其次是臭氧不可能将大分子氧化成小分子,因而中分子应该是为氧化过程中的小分子提供来源,而且仅在投加量较高时才发生这样的转化.

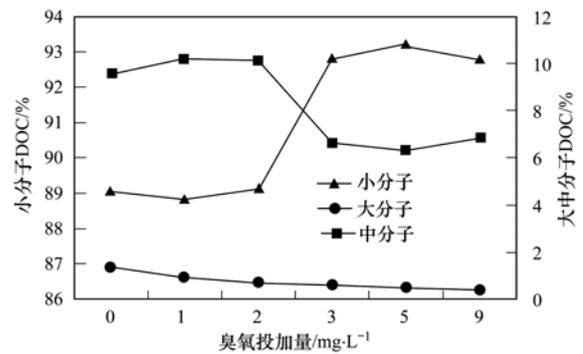


图5 臭氧投加量对有机物相对分子质量分布的影响
Fig. 5 Influence of ozone dose on relative molecular weight distribution of organics during ozonation

臭氧氧化对不同相对分子质量的 UV₂₅₄ 分布的影响如图 7 所示. 随着臭氧投加量的增加,原水以及中分子的 UV₂₅₄ 呈下降趋势,而小分子的保持不变,但当投加量达到 9 mg·L⁻¹时,小分子的 UV₂₅₄ 突

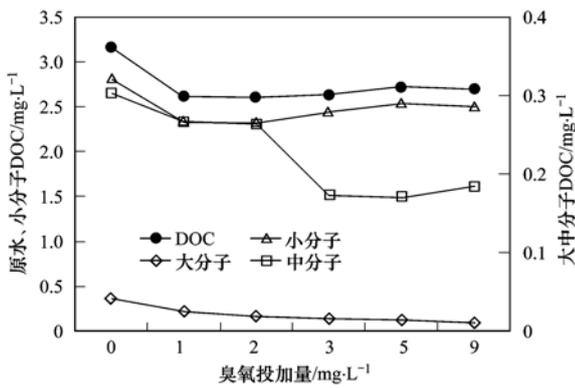


图 6 臭氧投加量对相对分子质量 DOC 的影响

Fig. 6 Influence of ozone dose on relative molecular weight distribution of DOC during ozonation

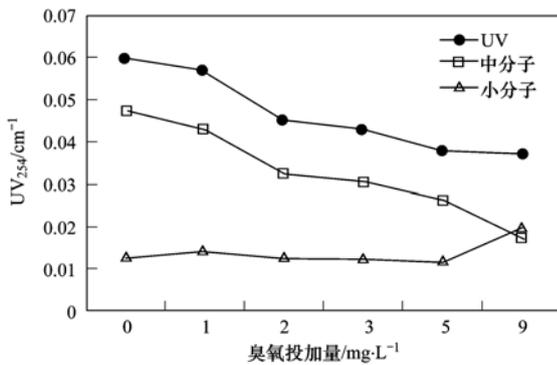


图 7 臭氧投加量对相对分子质量 UV₂₅₄ 的影响

Fig. 7 Influence of ozone dose on relative molecular weight distribution of UV₂₅₄ during ozonation

然增加。

为了进一步了解臭氧氧化过程中的有机物相对分子质量变化与 AOC 生成之间的关系,将不同相对分子质量的 SUVA 在不同臭氧投加量下的变化联系起来。由于 SUVA 的大小与有机物的亲疏水有密切的关系。它的值越小,说明亲水性越强,反之亦然。由图 8 可见,随着臭氧投加量的增加, SUVA 也呈明显下降。这说明臭氧使有机物趋向亲水。令人注意的是,中分子有机物的 SUVA 非常高,说明了较高的疏水性,但在臭氧的作用下, SUVA 迅速下降,其趋势与原水的 SUVA 相似,说明臭氧可有效降低中分子有机物的疏水性。小分子有机物的 SUVA 很低,说明具有较高的亲水性,但在投加量为 $9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时增加。比较图 4,可以认为小分子的亲水性,即它的 SUVA 值与 AOC 的生成量有关。

2.2 臭氧氧化过程中 pH 值对 AOC 生成量的影响

将原水 ($\text{pH} = 8.25$) 调至不同的 pH (分别为 5、6、7、9),再分别通入 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ O}_3$ 。不同 pH 的水

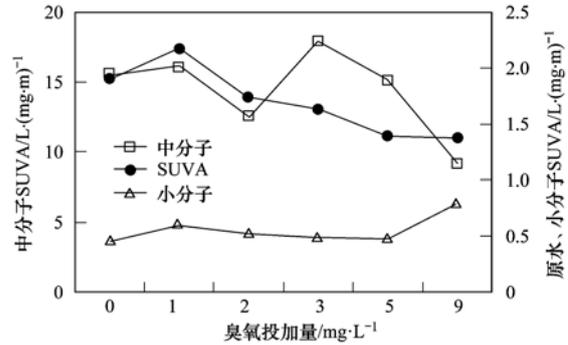


图 8 臭氧投加量对有机物 SUVA 的影响

Fig. 8 Effects of ozone dose on SUVA of organics during ozonation

样经臭氧氧化后,再将 pH 调节至 7 左右,考察 pH 值对臭氧氧化后 AOC 生成量的影响。图 9(a)表明, AOC 的生成量受 pH 影响很大,随着 pH 的升高, AOC 生成量明显提高;随着 pH 的降低, AOC 生成量迅速下降。在臭氧氧化过程中, AOC 生成量的变化与未投加臭氧的相似,但 AOC 生成量明显高于未投加的,如图 9(b)所示。

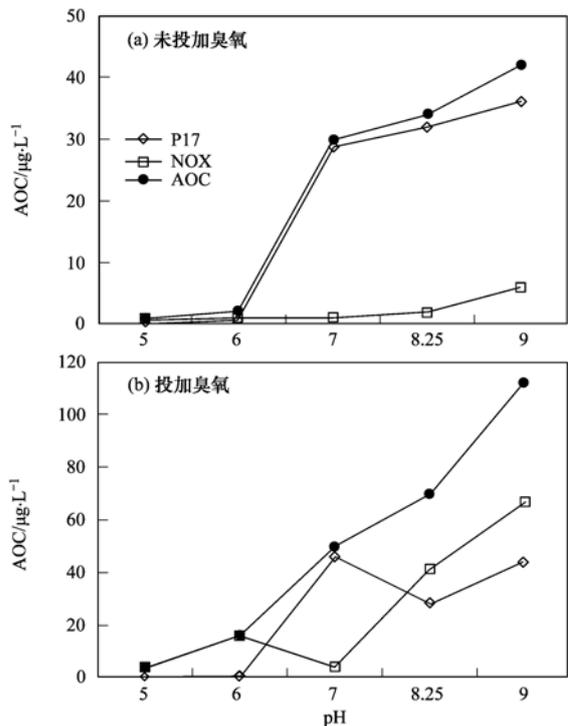


图 9 pH 值对臭氧氧化过程中 AOC 生成的影响

Fig. 9 Effects of pH on AOC formation during ozonation

pH 变化时的有机物以及相对分子质量有机物的变化如图 10 所示。从中可知,当 pH 变化时,虽然总有机物没有变化,但不同相对分子质量的有机物产生了很大的变化。当 pH 低于 7 时,中等分子有机物增加而小分子有机物减少;当 pH 大于 7 时,中等分子有机物减少而小分子有机物增加。许多天然有

肌物带有羧基官能团,即 $\text{—COO}^- \text{H}^+$. 当水呈碱性时,官能团呈负电性,亲水性增强,分子尺寸变小;而水呈酸性时,官能团呈中性,有机物的疏水性增强,分子量变大. 因此,当 pH 为中性或碱性时,小分子有机物占多数,导致 AOC 增加;而当 pH 为酸性时,中等分子有机物占多数,导致 AOC 减少.

本研究进一步考察了 pH 变化时的有机物分子量 SUVA 的变化,如图 11 所示. 从中可知,当 pH 低于 6 时,小分子的 SUVA 迅速增加,说明在低 pH 的情况下,小分子有机物趋向疏水性,AOC 生成量减少; pH 高于 6 时,小分子的 SUVA 明显降低,趋向亲水性,AOC 生成量增加. 由此可见,小分子有机物的亲疏水性,即它们的 SUVA 高低与 AOC 生成量的多少有着密切的关系.

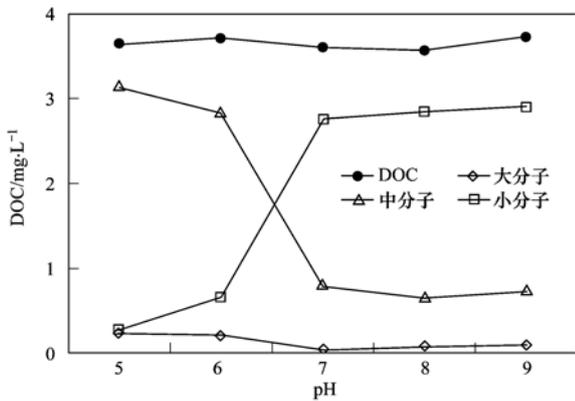


图 10 pH 变化对不同相对分子质量分布的影响
Fig. 10 Influence of pH variation on distribution of relative molecular weight

2.3 臭氧氧化过程中离子强度对 AOC 生成量的影响

为考察离子强度对臭氧氧化过程的影响,经 0.45 μm 膜滤后的原水中加入不同质量的 NaCl,配制成原水、0.01、0.02、0.1、0.2、0.4、0.6 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 的试验水样,再向水样中通入 2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ O_3 ,以研究不同离子强度下臭氧氧化过程中 AOC 的生成情况.

不同离子强度的水样在经臭氧氧化前后的 AOC 见图 12. 由图 12(a)中可以看出,当向原水中加入了 0.01、0.02、0.1、0.2 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 后,AOC 值在 38 ~ 41 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间波动,与原水的 37 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 非常接近;但若加入 0.4 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 0.6 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 后,AOC 值为 0 (数据未给出). 这说明当离子强度较低(不超过 0.2 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl)时,此浓度下的离子浓度不会影响 P17 和 NOX 菌的正常生长. Mun 等^[22]研究了不同离子强度下的 AOC 变化,结果与本试验的相似,但未给出解释.

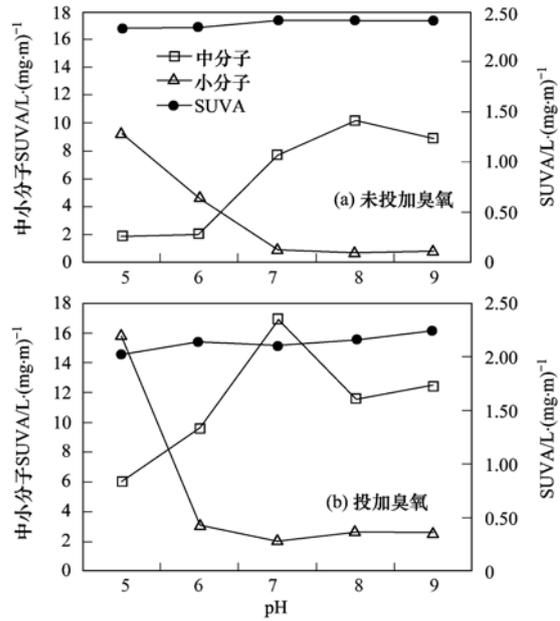


图 11 pH 变化对相对分子质量的 SUVA 的影响
Fig. 11 Influence of pH variation on SUVA of relative molecular weight

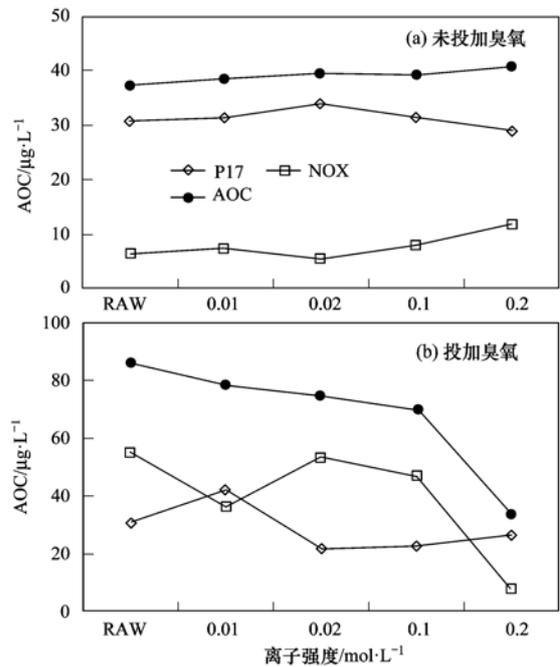


图 12 离子强度对臭氧氧化过程中 AOC 生成量的影响
Fig. 12 Effects of ionic strength on formation of AOC during ozonation

图 13 表明离子强度变化时的有机物 SUVA 的变化情况. 由图 13(a)可知,当离子强度增加时,无论是原水有机物还是不同相对分子质量的 SUVA 均呈略为增加的趋势,说明离子强度的增加导致有机物的疏水性. 图 13(b)表明,在投加臭氧的情况下,虽然有机物的 SUVA 变化不大,但臭氧氧化降低了

中分子的 SUVA, 而小分子 SUVA 呈上升的趋势. 比较图 5, 可以发现离子强度的增加明显增加了小分子的 SUVA, 使之更加疏水性, 这造成了 AOC 生成量降低.

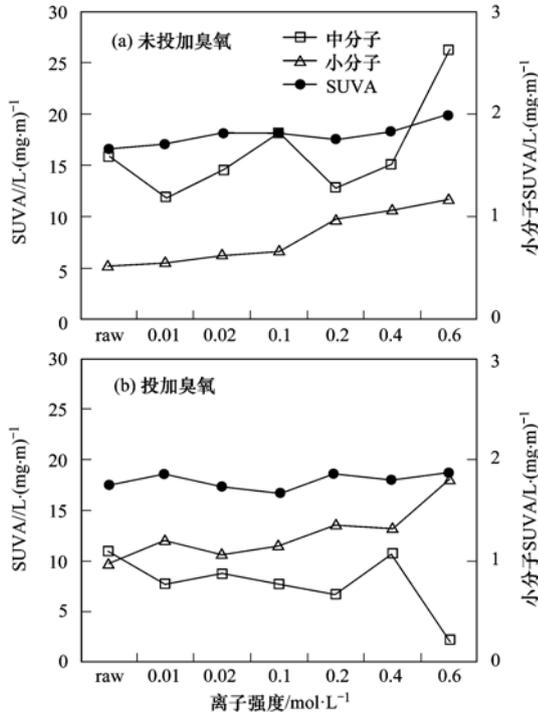


图 13 离子强度的变化与有机物 SUVA 的关系
Fig. 13 Relationship between ionic strength variation and SUVA of organics

2.4 臭氧氧化亲疏水性组分的 AOC 生成量

将浓缩后的原水经组分分离得到强疏、弱疏、极亲、中亲这 4 种组分后, 再分别对其通入 2 mg·L⁻¹、5 mg·L⁻¹ O₃, 氧化后 AOC 的生成量如图 14 所示. 每种组分经臭氧氧化后, AOC 均随着臭氧投加量的增加而升高. 强疏组分原水中 AOC 为 46 μg·L⁻¹, 经 2 mg·L⁻¹、5 mg·L⁻¹ O₃ 氧化后, 分别增至 49 μg·L⁻¹、100 μg·L⁻¹, 增加了 7.0% 和 117.9%. 弱疏组分的增加同样明显, 从 71 μg·L⁻¹ 分别增至 81 μg·L⁻¹、127 μg·L⁻¹, 增加了 14.2% 和 78.6%. 而亲水组分 AOC 生成量增加的并不明显, 当臭氧投加量为 5 mg·L⁻¹ 时, 极亲的 AOC 增加了 51.4%, 而中亲组分仅增加了 3.8%.

在不同的有机物组分下, AOC 中的 P17 和 NOX 发生了变化. 在强疏组分中, P17 占多数, 与原水的一致, 在臭氧的作用下, P17 和 NOX 增加. 在弱疏组分中, P17 和 NOX 的含量几乎相同, 通过臭氧的氧化, NOX 明显增加而 P17 下降. 对于中亲组分, NOX 多于 P17, 并随着臭氧投加量的增加, 产生先略下降

后略增加的现象. 在极亲组分中, AOC 几乎完全由 NOX 构成, 并在臭氧的作用下, 略有增加. 一些研究报道了臭氧氧化有机物各组分的效果和机制, 但没有与 AOC 生成相联系^[23,24]; 而有的研究报道了有机物不同组分的 AOC 生成, 但没有考察臭氧氧化这些组分后的 AOC 变化^[13]. 臭氧导致 AOC 的增加, 是由于臭氧将疏水有机物氧化成亲水有机物, 而这些有机物可为 AOC 菌所利用, 从而造成 AOC 的增加. Swietlik 等^[23]发现, 臭氧氧化疏水性组分会产生大量的羧酸, 包括草酸, 而草酸正是为 NOX 所利用. 这就解释了为何弱疏组分被臭氧氧化后, NOX 大量生成, 从而 AOC 生成量最多. Jin 等^[25]的研究表明, 强疏组分首先被臭氧氧化成弱疏, 然后再转化成亲水. 这说明臭氧更容易将弱疏组分氧化转化成亲水组分, 因而 AOC 的生成量更多, 这解释了为何弱疏组分经臭氧氧化后的 AOC 生成量高于强疏的.

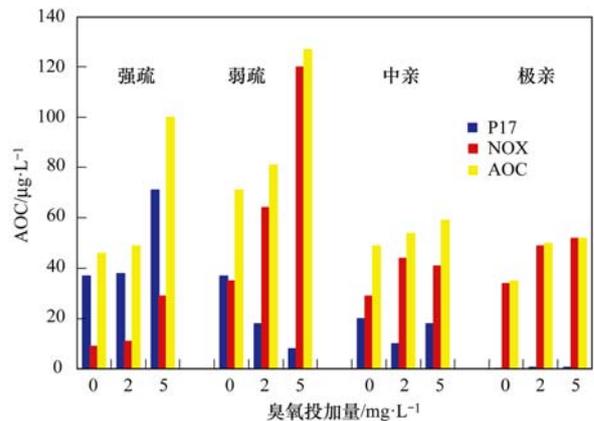


图 14 有机物组分臭氧氧化后的 AOC 生成量
Fig. 14 Formation of AOC for organic fractions after ozonation

臭氧氧化对不同有机物组分的相对分子质量分布的情况如图 15 所示. 对于强疏组分, 臭氧氧化将中等分子氧化成小分子, 对于弱疏组分和中亲组分, 也有相似的趋势, 这说明臭氧氧化过程中的各组分 AOC 的增加是由于中等分子氧化成小分子, 造成小分子有机物的增加所致. 在图 14 中, 弱疏组分中的 NOX 在臭氧氧化后明显增加, 而 P17 却明显下降; 同时可以看出, 弱疏组分的多数 AOC 为 NOX 所贡献.

有机物各组分不同相对分子质量的 SUVA 以及它们在臭氧氧化后的变化如图 16 所示. 臭氧氧化使疏水组分的 SUVA 降低, 无论是中分子还是小分子. 图 16 还表明, 极亲组分的 SUVA 较高, 这是由于洗脱树脂所投加的酸碱导致极亲组分的离子强度较高, 使之疏水性, 从而降低了 AOC 生成量.

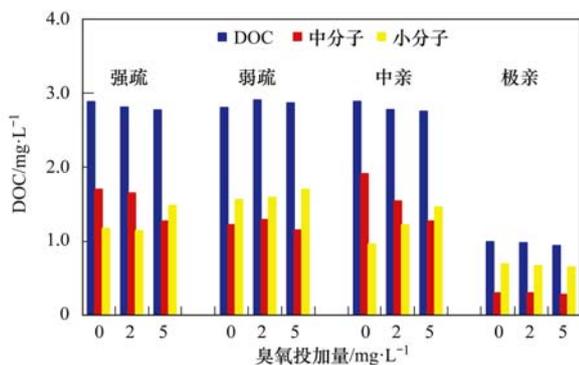


图 15 臭氧氧化对相对分子质量的有机物组分的影响

Fig. 15 Influence of ozone oxidation on relative molecular weight of organic fractions

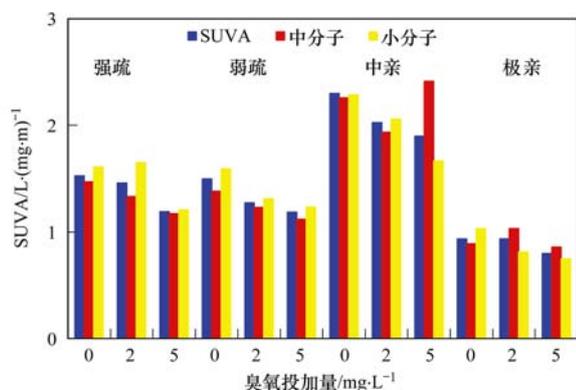


图 16 臭氧氧化对相对分子质量的有机物组分 SUVA 的影响

Fig. 16 Influence of ozone oxidation on SUVA of relative molecular weight of organic fractions

由前面的研究可知,小分子 SUVA 与 AOC 有密切的关系,为了进一步考察它们之间的关系,将试验的小分子 SUVA 与 AOC 汇总,如图 17 所示.从中可知,小分子 SUVA 与 AOC 有较好的相关关系.当小分子 SUVA 大于 $3 \text{ L} \cdot (\text{mg} \cdot \text{m})^{-1}$ 时,AOC 生成量很

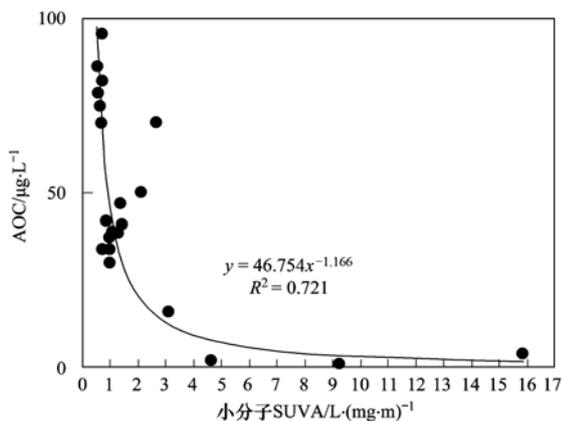


图 17 AOC 与小分子有机物 SUVA 的关系

Fig. 17 Relationship of AOC and SUVA of organics with small molecular weight

少,但当小分子 SUVA 在低于 $1 \text{ L} \cdot (\text{mg} \cdot \text{m})^{-1}$ 时,AOC 生成量增加.当 SUVA 大于 $4 \text{ L} \cdot (\text{mg} \cdot \text{m})^{-1}$ 时,有机物主要为疏水性特别是芳香族类,而当 SUVA 小于 $3 \text{ L} \cdot (\text{mg} \cdot \text{m})^{-1}$ 时,有机物主要由亲水性组分构成^[26].换言之,亲水的小分子有机物的 AOC 生成量大.图 17 所阐明的小分子 SUVA 与 AOC 的关系,可为控制 AOC,从而保持生物稳定性提供新的思路.

3 结论

(1) AOC 的生成量随着臭氧投加量的增加而升高.臭氧可降低中等分子有机物的疏水性,并随着投加量的增加而持续降低.

(2) pH 低于 7,有机物主要由疏水性中等分子构成;pH 大于 7,有机物主要由亲水性小分子组成.AOC 的生成量随着 pH 的升高而显著增加,随 pH 的降低而降低,AOC 的生成量与低的 SUVA 小分子有机物相关.

(3) 增加离子强度会增强有机物的疏水性,降低 AOC 生成量.

(4) 4 种组分经臭氧氧化后,AOC 均有不同程度的升高,疏水性有机物的增加程度大于亲水性物质,表明弱疏和强疏组分具有较高的 AOC 生成潜能.

(5) AOC 的生成量与小分子有机物的亲水程度相关,并可用 SUVA 表达,它们之间呈负指数的关系.较低 SUVA 的小分子有机物生成的 AOC 量较大,即较强的亲水性小分子有机物生成较多的 AOC.

参考文献:

- [1] 刘文君, 吴红伟, 张淑琪, 等. 某市饮用水水质生物稳定性研究[J]. 环境科学, 1999, 20(2): 34-37.
- [2] 吴红伟, 刘文君, 王占生. 臭氧组合工艺去除饮用水源水中有机物的效果[J]. 环境科学, 2000, 21(4): 29-33.
- [3] 鲁巍, 唐峰, 张晓健, 等. 净水工艺对饮用水生物稳定性控制的研究[J]. 环境科学, 2005, 26(6): 71-74.
- [4] 孔令宇, 张晓健, 王占生. 臭氧-生物活性炭组合工艺中最佳臭氧投加剂量的确定[J]. 环境科学, 2006, 27(7): 1345-1347.
- [5] 陈士才, 雷云霞. 不同给水处理工艺的饮用水生物稳定性研究[J]. 中国给水排水, 2008, 24(19): 28-31, 36.
- [6] 乔铁军, 张锡辉. 臭氧生物活性炭技术应用中水质安全研究[J]. 环境科学, 2009, 30(11): 3311-3315.
- [7] 蔡璇. 饮用水深度处理技术研究进展及应用现状[J]. 净水技术, 2015, 34(S1): 44-47.
- [8] Sallanko J, Väisänen T. Effects of ozonation on AOC content of humic Finnish groundwater[J]. Ozone: Science & Engineering:

- the Journal of the International Ozone Association, 2013, **35** (2): 86-89.
- [9] 王继萍, 华伟, 蒋福春, 等. 臭氧-生物活性炭工艺去除 AOC 和有机物的效果研究[J]. 给水排水, 2014, **40**(2): 11-15.
- [10] 舒诗湖, 严敏, 苏定江, 等. 臭氧-生物活性炭对有机物分子量分布的影响[J]. 中国环境科学, 2007, **27**(5): 638-641.
- [11] Hem L J, Efraim H. Assimilable organic carbon in molecular weight fractions of natural organic matter[J]. Water Research, 2001, **35**(4): 1106-1110.
- [12] Wang X W, LI D S, Xi B D, *et al.* Molecular weight distributions of effluent organic matters and the biodegradability assessment of a typical advanced drinking water treatment plant in South China[J]. Desalination and Water Treatment, 2015, **53** (7): 1855-1861.
- [13] Labanowski J, Feuillade G. Combination of biodegradable organic matter quantification and XAD-fractionation as effective working parameter for the study of biodegradability in environmental and anthropic samples[J]. Chemosphere, 2009, **74**(4): 605-611.
- [14] CJ/T 3028. 2-1994, 臭氧发生器臭氧浓度、产量、电耗的测量[S].
- [15] 张晗, 董秉直. HPSEC-UV-TOC 联用技术测定有机物相对分子质量分布[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 3144-3151.
- [16] 胡孟柳, 林洁, 许光红, 等. 天然有机物的相对分子质量分布及亲疏水性对微滤膜组合工艺中膜污染的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 169-176.
- [17] 何欢, 董秉直, 许光红, 等. 颗粒状大孔阴树脂去除有机物以及缓解膜污染的效果与机制[J]. 环境科学, 2014, **35** (5): 1824-1831.
- [18] Chow C W K, Fabris R, van Leeuwen J, *et al.* Assessing natural organic matter treatability using high performance size exclusion chromatography [J]. Environmental Science & Technology, 2008, **42**(17): 6683-6689.
- [19] Lai C H, Chou Y C, Yeh H H. Assessing the interaction effects of coagulation pretreatment and membrane material on UF fouling control using HPSEC combined with peak-fitting[J]. Journal of Membrane Science, 2015, **474**: 207-214
- [20] Xing L N, Fabris R, Chow C W K, *et al.* Prediction of DOM removal of low specific UV absorbance surface waters using HPSEC combined with peak fitting[J]. Journal of Environmental Science, 2012, **24**(7): 1174-1180.
- [21] Ramseier M K, Peter A, Traber J, *et al.* Formation of assimilable organic carbon during oxidation of natural waters with ozone, chlorine dioxide, chlorine, permanganate, and ferrate [J]. Water Research, 2011, **45**(5): 2002-2010.
- [22] Mun E, Lee S, Kim I, *et al.* Measurements of assimilable organic carbon (AOC) in high saline conditions using P17[J]. Water Science & Technology: Water Supply, 2013, **13** (2): 265-272.
- [23] Świetlik J, Dąbrowska A, Raczyk-Stanisławiak U, *et al.* Reactivity of natural organic matter fractions with chlorine dioxide and ozone[J]. Water Research, 2004, **38**(3): 547-558.
- [24] 鲁金凤, 张涛, 马军, 等. 滤后水中 NOM 经臭氧氧化产生的小分子醛、酮和酮酸[J]. 环境科学, 2007, **28**(6): 1268-1273.
- [25] 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.
- [26] Matilainen A, Gjessing E T, Lahtinen T, *et al.* An overview of the methods used in the characterisation of natural organic matter (NOM) in relation to drinking water treatment [J]. Chemosphere, 2011, **83**(11): 1431-1442.

CONTENTS

Exploring the Severe Haze in Beijing During December, 2015; Pollution Process and Emissions Variation	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, NIE Teng, <i>et al.</i> (1593)
Pollution Characteristics and Source of HULIS in the Fine Particle During the Beijing APEC	ZHOU Xue-ming, QI Xue-jiao, XIANG Ping, <i>et al.</i> (1602)
Seasonal Variation Characteristics and Potential Source Contribution of Sulfate, Nitrate and Ammonium in Beijing by Using Single Particle Aerosol Mass Spectrometry	LIU Lang, ZHANG Wen-jie, DU Shi-yong, <i>et al.</i> (1609)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Lanzhou City	WANG Xin, NIE Yan, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1619)
Pollution Level and Source Apportionment of Atmospheric Particles PM _{2.5} in Southwest Suburb of Chengdu in Spring	LIN Yu, YE Zhi-xiang, YANG Huai-jin, <i>et al.</i> (1629)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Simian Mountain Background Station in Mid-subtropical Region	LIU Wei-ming, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1639)
Establishment of Method for Health Risk Assessment of Pollutants from Fixed Sources	CHEN Qiang, WU Huan-bo (1646)
Testing of Concentration and Characteristics of Particulate Matters Emitted from Stationary Combustion Sources in Beijing	HU Yue-qi, WU Xiao-dong, WANG Chen, <i>et al.</i> (1653)
Pollution Evaluation and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in the Parks of Nanjing	WANG Cheng, QIAN Xin, LI Hui-ming, <i>et al.</i> (1662)
CoCuMnO ₂ Photocatalyzed Oxidation of Multi-component VOCs and Kinetic Analysis	MENG Hai-long, BO Long-li, LIU Jia-dong, <i>et al.</i> (1670)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Tidal Reach and Estuary of the Daliao River and Analysis of Potential Eutrophication	ZHANG Lei, CAO Wei, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (1677)
Spatial Distribution of Stable Isotope from the Lakes in Typical Temperate Glacier Region	SHI Xiao-yi, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (1685)
$\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ Tracing of Nitrate Sources in Beijing Urban Rivers	ZHAO Qing-liang, MA Hui-ya, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (1692)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Nitrate Pollution in Shallow Groundwater of Liujiang Basin	WANG He, GU Hong-biao, CHI Bao-ming, <i>et al.</i> (1699)
Nitrogen Losses Under the Action of Different Land Use Types of Small Catchment in Three Gorges Region	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1707)
Interception Effect of Ecological Ditch on Nitrogen Transport in Agricultural Runoff in Subtropical China	WANG Di, LI Hong-fang, LIU Feng, <i>et al.</i> (1717)
Biodegradation Coefficients of Typical Pollutants in the Plain Rivers Network	FENG Shuai, LI Xu-yong, DENG Jian-cai (1724)
Influence of Submerged Plants on Microbial Community Structure in Sediment of Hongze Lake	ZHANG Ding-yu, ZHANG Ting-xi, DONG Dan-ping, <i>et al.</i> (1734)
Community Structure Characteristics of Diatom in Reservoirs Located in the South of Jiangsu Province, China and Its Control Factors	REN Jie, ZHOU Tao, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1742)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Mercury in Hengshuihu Wetland, Hebei Province	WANG Nai-shan, ZHANG Man-yin, CUI Li-juan, <i>et al.</i> (1754)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils and Sediments in Shunde Waterway, Southern China	CAI Yi-min, CHEN Wei-ping, PENG Chi, <i>et al.</i> (1763)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of PBDEs in Water and Sediment from an Electronic Waste Dismantling Area in Taizhou	CHEN Xiang-ping, PENG Bao-qi, LÜ Su-ping, <i>et al.</i> (1771)
Major Ionic Features and Their Controlling Factors in the Upper-Middle Reaches of Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (1779)
Export of Total Organic Carbon (TOC) from Karst Watershed and Its Influencing Factors; An Example from Xueyudong Underground River System, Chongqing	WANG Qiao-lian, JIANG Yong-jun, CHEN Yu (1788)
Seasonal Variations and Controlling Factors of the Element Contents in Drip Waters Collected from the Baojingong Cave in Guangdong Province	HUANG Jia-yi, CHEN Lin, CHEN Qiong, <i>et al.</i> (1798)
Tracing the Fecal Contamination Sources Based on <i>Bacteroides</i> 16S rRNA PCR-DGGE in Karst Groundwater; Taking Laolongdong Underground River System, Nanshan, Chongqing as an Example	ZHANG Hong, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1805)
Sources and Variation Characteristics of Dissolved Lipid Biomarkers in a Typical Karst Underground River	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (1814)
Formation of Halogenated By-products in Co ²⁺ Activated Peroxymonosulfate Oxidation Process	LIU Kuo, JIN Hao, DONG Wei, <i>et al.</i> (1823)
Aspartic Acid Generated in the Process of Chlorination Disinfection By-product Dichloroacetonitrile	DING Chun-sheng, LI Nai-jun, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (1831)
Influencing Factors of Assimilable Organic Carbon (AOC) Formation in Drinking Water During Ozonation Process	DONG Bing-zhi, ZHANG Jia-li, HE Chang (1837)
Wastewater Quantity and Quality Fluctuation Characteristics of Typical Area of Hybrid Sewage System	CHENG Xun, ZHANG Ming-kai, LIU Yan-chen, <i>et al.</i> (1845)
Preparation of HDTMA-modified Zeolite and Its Performance in Nitro-phenol Adsorption from Wastewaters	GUO Jun-yuan, WANG Bin (1852)
Selection of Suitable Microalgal Species for Sorption of Uranium in Radioactive Wastewater Treatment	LI Xin, HU Hong-ying, YU Jun-yi, <i>et al.</i> (1858)
Magnetic Fe ₃ O ₄ Microparticles Conditioning-Pressure Electro-osmotic Dewatering (MPEOD) of Sewage Sludge	QIAN Xu, WANG Yi-li, ZHAO Li (1864)
Stability of Short-cut Nitrification Nitrogen Removal in Digested Piggery Wastewater with an Intermittently Aerated Sequencing Batch Reactor	SONG Xiao-yan, LIU Rui, SHUI Yong, <i>et al.</i> (1873)
Effect of Irrigation Patterns on Soil CO ₂ and N ₂ O Emissions from Winter Wheat Field in North China Plain	GUO Shu-fang, QI Yu-chun, YIN Fei-hu, <i>et al.</i> (1880)
Characteristics of Dissolved CH ₄ and N ₂ O Concentrations of Weihe River in Xinxiang Section in Spring	HOU Cui-cui, ZHANG Fang, LI Ying-chen, <i>et al.</i> (1891)
Effect of Stimulated N Deposition on N ₂ O Emission from a <i>Stipa krylovii</i> Steppe in Inner Mongolia, China	YANG Han-yue, ZHANG Ting, HUANG Yong-mei, <i>et al.</i> (1900)
Response of Soil Respiration and Organic Carbon to Returning of Different Agricultural Straws and Its Mechanism	CAO Zhan-bo, WANG Lei, LI Fan, <i>et al.</i> (1908)
Spatial Variability and Distribution Pattern of Soil Organic Matter in a Mollisol Watershed of China	GAO Feng-jie, MA Quan-lai, HAN Wen-wen, <i>et al.</i> (1915)
Effects of Tillage on Distribution of Heavy Metals and Organic Matter Within Purple Paddy Soil Aggregates	SHI Qiong-bin, ZHAO Xiu-lan, CHANG Tong-ju, <i>et al.</i> (1923)
Distribution Characteristics and Potential Ecological Hazards Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	ZHAO Qian, MA Lin, LIU Yi-fei, <i>et al.</i> (1931)
Contamination Assessment and Sources Analysis of Soil Heavy Metals in Opencast Mine of East Junggar Basin in Xinjiang	LIU Wei, YANG Jian-jun, WANG Jun, <i>et al.</i> (1938)
Effect of Nano-TiO ₂ on Release and Speciation Changes of Heavy Metals in Soil	ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, LIANG Li, <i>et al.</i> (1946)
Reduction Kinetics of Cr(VI) in Chromium Contaminated Soil by Nanoscale Zerovalent Iron-copper Bimetallic	MA Shao-yun, ZHU Fang, SHANG Zhi-feng (1953)
Inhibition of Low Molecular Organic Acids on the Activity of <i>Acidithiobacillus</i> Species and Its Effect on the Removal of Heavy Metals from Contaminated Soil	SONG Yong-wei, WANG He-ru, CAO Yan-xiao, <i>et al.</i> (1960)
Contribution of Particle Size and Surface Coating of Silver Nanoparticles to Its Toxicity in Marine Diatom <i>Skeletonema costatum</i>	HUANG Jun, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (1968)
Rhizospheric Mechanisms of <i>Hemerocallis middendorfii</i> Trautv. et Mey. Remediating Petroleum-contaminated Soil and Metabonomic Analyses of the Root Systems	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1978)
Effects of Thermophilic Composting on Antibiotic Resistance Genes (ARGs) of Swine Manure Source	ZHENG Ning-guo, HUANG Nan, WANG Wei-wei, <i>et al.</i> (1986)
Interaction Between Sulfonamide Antibiotics Fates and Chicken Manure Composting	LIN Hui, WANG Jian-mei, SUN Wan-chun, <i>et al.</i> (1993)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2016年5月15日 第37卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 5 May 15, 2016

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@reces. 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@reces. 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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行