

百方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.4
第40卷 第4期

目次

南京江北新区大气单颗粒来源解析及混合状态 于兴娜, 时政, 马佳, 李梅, 龚克坚(1521)

西安市PM_{2.5}中碳质气溶胶污染特征 牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 沈振兴, 华晓羽, 张梓萌, 孙浩堯, 王玛敏, 张立欣(1529)

太原市冬季PM_{2.5}化学组分特征与来源解析 刘素, 马彤, 杨艳, 高健, 彭林, 曹力媛, 逢妮妮, 张浩杰(1537)

郑州市大气细颗粒物中水溶性离子季节性变化特征及其源解析 闫广轩, 张靖雯, 雷豪杰, 黄海燕, 唐明双, 曹治国, 李云蓓, 樊静, 王跃思, 李怀刚(1545)

珠海市郊区大气PM_{2.5}中元素特征及重金属健康风险评价 杨毅红, 贾燕, 卞国建, 于晓巍, 钟昌琴, 全鼎余(1553)

一次沙尘事件对沿海及海洋大气气溶胶中金属粒径分布的影响 金同俊, 祁建华, 郝梓延, 林学辉(1562)

基于SOA转化机制的沧州市重点企业秋冬季大气污染模拟 高爽, 伯鑫, 马岩, 雷团团, 王刚, 李时蓓, 陆朝阳, 毛娜, 郝明亮, 黄向峰(1575)

京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析 孙爽, 李令军, 赵文吉, 齐梦溪, 田欣, 李珊珊(1585)

2015~2017年北京及近周边平房燃煤散烧及其污染排放遥感测算 赵文慧, 李令军, 鹿海峰, 姜磊, 张立坤, 王新辉, 邱昀(1594)

基于地基遥感的杭州地区气溶胶光学特性 齐冰, 车慧正, 徐婷婷, 杜荣光, 胡德云, 梁卓然, 马千里, 姚杰(1604)

四川省人为源挥发性有机物组分清单及其臭氧生成潜势 周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 宋丹林, 黄凤霞, 周小玲(1613)

餐饮源挥发性有机物组成及排放特征 高雅琴, 王红丽, 许睿哲, 景盛翱, 刘跃辉, 彭亚荣(1627)

广州番禺大气成分站一次典型光化学污染过程PAN和O₃分析 邹宇, 邓雪娇, 李菲, 殷长泰(1634)

北京市典型道路扬尘化学组分特征及年际变化 胡月琪, 李萌, 颜旭, 张超(1645)

南昌市扬尘PM_{2.5}中多环芳烃的来源解析及健康风险评价 于瑞莲, 郑权, 刘贤荣, 王珊珊, 赵莉斯, 胡恭任(1656)

道路扬尘排放因子建立方法与应用 樊守彬, 杨涛, 王凯, 李雪峰(1664)

现实工况下挖掘机电尾气排放特征分析 马帅, 张凯山, 王帆, 庞凯莉, 朱怡静, 李臻, 毛红梅, 胡宝梅, 杨锦锦, 王斌(1670)

雾-霾天人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶的微生物特性 杨唐, 韩云平, 李琳, 刘俊新(1680)

霾天能见度参数化方案改进及预报效果评估 赵秀娟, 李梓铭, 徐敬(1688)

支持向量机回归在臭氧预报中的应用 苏筱倩, 安俊琳, 张玉欣, 梁静舒, 刘静达, 王鑫(1697)

基于中国电网结构及一线典型城市车辆出行特征的PHEV二氧化碳排放分析 郝旭, 王贺武, 李伟峰, 欧阳明高(1705)

岩溶槽谷区地下河硝酸盐来源及其环境效应:以重庆龙凤槽谷地下河系统为例 段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 曾泽, 王正雄, 吴韦, 彭学义, 刘九缠(1715)

胶州湾表层水体中邻苯二甲酸酯的污染特征和生态风险 刘成, 孙翠竹, 张智, 唐燎, 邹亚丹, 徐擎擎, 李锋民(1726)

湛江湾沉积物中六六六(HCHs)、滴滴涕(DDTs)有机氯农药的分布特征与风险评估 彭诗云, 彭平安, 孔德明, 陈法锦, 于赤灵, 李嘉诚, 梁宇钊, 宋建中(1734)

生态净化系统中DOM光学特性及影响因素分析:以盐龙湖春季为例 马睿, 李璇, 王莲, 王家新, 马卫星, 丁成, 吴向阳(1742)

溶解性有机物(DOM)与区域土地利用的关系:基于三维荧光-平行因子分析(EEM-PARAFAC) 李昀, 魏鸿杰, 王侃, 张招招, 于旭彪(1751)

汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析 谢经朝, 赵秀兰, 何丙辉, 李章安(1760)

基于RZWQM模型模拟太行山低山丘陵区农田土壤硝态氮迁移及淋溶规律 郑文波, 王仕琴, 刘丙霞, 雷玉平, 曹建生(1770)

澜沧江流域梯级水库建设下水体营养盐和叶绿素a的空间分布特征 程豹, 望雪, 马金川, 杨正健, 刘德富, 马骏(1779)

福州地区海湾和河口潮汐沼泽湿地秋季上覆水营养盐分布特征 何露露, 杨平, 谭立山, 仝川, 黄佳芳(1788)

尾水受纳河流中PhACs在传统水相中的分布及环境风险 王硕, 刘建超, 郑超亚, 张吉琛, 许嘉诚, 徐莹莹, 陆光华(1797)

绿色屋顶雨洪调控能力与效益评价 李俊生, 尹海伟, 孔繁花, 陈佳宇, 邓金玲(1803)

超声活化过硫酸盐降解水中典型臭味 孙昕, 孙杰, 李鹏飞, 汤加刚, 杨晴, 唐晓(1811)

金属有机框架MIL-53(Fe)可见光催化还原水中U(VI) 闫增元, 刁海玲, 袁立永(1819)

覆盖材料对洱海不同湖区沉积物溶解态有机磷和无机磷释放影响及差异 龚佳健, 倪兆奎, 肖尚斌, 赵海超, 席银, 王圣瑞(1826)

气氧化铜改性介孔稻壳生物炭除磷性能 许润, 石程好, 唐倩, 石稳民, 康建雄, 任拥政(1834)

改性污泥基生物炭的性质与重金属吸附效果 陈坦, 周泽宇, 孟瑞红, 刘彦廷, 王洪涛, 陆文静, 金军, 刘颖(1842)

纳米磁性磷酸二氢钙对Cd的吸附、回收与再生 李玉娇, 杨志敏, 陈玉成, 黄磊, 唐海燕(1849)

赤铁矿抑制硫酸盐废水厌氧消化产甲烷过程中硫化氢形成与机制 黄绍福, 叶捷, 周顺桂(1857)

微藻膜反应器处理海水养殖废水性能及膜污染特性 马航, 李之鹏, 柳峰, 徐仲, 尤宏, 王芳, 陈其伟(1865)

生活污水预沉淀-SNAD颗粒污泥工艺小试 李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰(1871)

生活污水与人工配水对好氧颗粒污泥系统的影响 李冬, 王樱桥, 李帅, 张杰, 王玉刚(1878)

硫磺/硫酸铁自养反硝化系统脱氮性能 周娅, 买文宁, 梁家伟, 代吉华, 牛颖, 李伟利, 唐启(1885)

异养硝化细菌Pseudomonas putida YH的脱氮特性及降解动力学 汪旭晖, 杨垒, 任勇翔, 陈宁, 肖倩, 崔坤, 郇丹(1892)

污泥龄及pH值对反硝化除磷工艺效能的影响 韦佳敏, 黄慧敏, 程诚, 蒋志云, 刘文如, 沈耀良(1900)

盐度条件下ANAMMOX-EGSB反应器颗粒污泥微生物群落 王晗, 李瀚翔, 陈猷鹏, 郭劲松, 晏鹏, 方芳(1906)

内源磷PHA的贮存对混合菌群耐低温特性的影响 杨建鹏, 张健, 田晴, 朱艳彬, 李方, Wolfgang Sand(1914)

中国市政污泥中磷的含量与形态分布 王超, 刘清伟, 职音, 程柳, 王宁, 李彩丹, 毛宇翔(1922)

广州市售水产品中全氟烷基化合物的污染特征和安全风险评价 王旭峰, 王强, 黎智广, 黄珂, 李刘冬, 赵东豪(1931)

长江上游典型农业源溪流溶存氧化亚氮(N₂O)浓度特征及影响因素 田琳琳, 王正, 胡磊, 任光前, 朱波(1939)

内蒙古河套灌区不同盐碱程度土壤CH₄吸收规律 杨文柱, 焦燕, 杨铭德, 温慧洋(1950)

水稻光合碳在植株-土壤系统中分配与稳定对施磷的响应 王莹莹, 肖谋良, 张昀, 袁红朝, 祝贞科, 葛体达, 吴金水, 张广才, 高晓丹(1957)

土壤水分和温度对西南喀斯特棕色石灰土无机碳释放的影响 徐学池, 黄媛, 何寻阳, 王桂红, 苏以荣(1965)

黄土丘陵区侵蚀坡面土壤微生物量碳时空动态及影响因素 覃乾, 朱世硕, 夏彬, 赵允格, 许明祥(1973)

农用地土壤抗生素组成特征与积累规律 孔晨晨, 张世文, 聂超甲, 胡青青(1981)

生物发酵制药VOCs与臭味治理技术研究与进展 王东升, 朱新梦, 杨晓芳, 焦茹媛, 赵珊, 宋荣娜, 吕明哈, 杨敏(1990)

《环境科学》征订启事(1612) 《环境科学》征稿简则(1787) 信息(1663, 1796, 1833)

超声活化过硫酸盐降解水中典型臭味

孙昕¹, 孙杰¹, 李鹏飞¹, 汤加刚¹, 杨晴¹, 唐晓²

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710055; 2. 西安扬水源环境科技有限公司, 西安 710075)

摘要: 为有效解决饮用水臭味污染问题, 选取水中典型致嗅物质二甲基异莰醇(2-MIB)和土臭素(GSM)作为目标污染物, 系统研究了超声(US)活化过硫酸盐(PS)高级氧化技术对两种致嗅物质的降解规律及其影响因素。结果表明, 在15 min内超声/过硫酸盐联用工艺能有效去除水中典型臭味, 与单独超声处理相比, 2-MIB和GSM的去除率分别可提高57.0%和63.6%; 2-MIB与GSM浓度在100~800 ng·L⁻¹范围内US/PS联用工艺均有较高的去除率, 且在100 ng·L⁻¹时降解效果最佳, 去除率分别可达88.7%和93.3%; 典型致嗅物质的降解速率随PS浓度(0.25~2 mmol·L⁻¹)和US声强(0.33~0.53 W·cm⁻²)的增加而加快; 水体中腐殖酸存在会竞争消耗自由基使臭味降解受到抑制但影响效果不显著; 在反应体系中分别加入甲醇与叔丁醇(自由基清除剂)后, 2-MIB与GSM去除率明显下降, 且甲醇对臭味降解抑制程度强于叔丁醇, 表明US/PS高级氧化技术对臭味快速的降解主要是硫酸根自由基与羟基自由基共同作用的结果。

关键词: 二甲基异莰醇(2-MIB); 土臭素(GSM); 超声; 硫酸根自由基; 羟基自由基

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)04-1811-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201808255

Ultrasonically Activated Persulfate Degrades Typical Odors in Water

SUN Xin¹, SUN Jie¹, LI Peng-fei¹, TANG Jia-gang¹, YANG Qing¹, TANG Xiao²

(1. Key Laboratory of Northwest Water Resource, Environment and Ecology of Ministry of Education, School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Xi'an Jumping Water Environment Technology Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: In order to solve the problem of odor pollution in drinking water effectively, the typical odorants 2-methylisoborneol (2-MIB) and Geosmin (GSM) were selected as target pollutants. The degradation effect and factors influencing these two typical odors by ultrasonically (US) activated persulfate (PS) advanced oxidation technology were systematically investigated in this work. When the sample was treated for 15 min, the application of US/PS combination technology increased the removal rates of 2-MIB and GSM by 57.0% and 63.6%, respectively, compared with sonication alone. Furthermore, the optimum removal rates of 2-MIB and GSM were 88.7% and 93.3% when the 2-MIB and GSM concentrations were 100 ng·L⁻¹. Moreover, the degradation rates of 2-MIB and GSM increased with increasing PS concentration (from 0.25 mmol·L⁻¹ to 2 mmol·L⁻¹) and US intensity (from 0.33 W·cm⁻² to 0.53 W·cm⁻²). The presence of humic acid competes to consume free radicals to inhibit the degradation of odor. The addition of the radical scavengers methanol and tert-butanol can reduce the removal rates of 2-MIB and GSM. The presence of methanol had a stronger inhibition effect on odor degradation than tert-butanol, indicating that the odor removal was mainly caused by sulfate radicals and hydroxyl radicals in the combination US/PS technology.

Key words: 2-methylisoborneol (2-MIB); geosmin (GSM); ultrasound; sulfate radicals; hydroxyl radicals

近年来, 微污染水源水中产生的臭味问题^[1]引起了人们的广泛关注。水中异味破坏了饮用水的感官性状, 常引起自来水用户怀疑与投诉, 已成为供水行业不可忽视的问题^[2,3]。此外, 臭味物质还可积累于水生生物体内影响水产品的品质^[4], 损害了水产养殖业的经济利益。土霉味被认为是淡水水体中存在最广泛且最难闻的一种臭味, 其中以2-甲基异莰醇(2-methylisoborneol, 2-MIB)与土臭素(geosmin, GSM)最常见, 为水体中典型臭味。这种泥土味主要为蓝藻(水环境)和丝状放线菌(土壤环境)的代谢产物^[5]。水中典型臭味严重超标时浓度可达约800 ng·L⁻¹^[6,7], 而常规水处理工艺对这两种典型致嗅物质难以有效去除。因此研究一种高效经济的除嗅技术对保证饮用水质量和提升水产品

质具有重要的现实意义。

学者们相继提出了吸附技术^[8]、化学氧化技术^[9]、生物处理技术^[10]、以及组合工艺^[11]等手段去除水中2-MIB和GSM等典型臭味。但活性炭等吸附剂回收困难不宜长期使用, 生物处理受限于去除周期长, 而二氧化氯、高锰酸盐等传统氧化剂去除率极低。高级氧化技术具有反应速率快, 简单可控等优点受到广泛关注, 其依赖于反应体系中产生的羟基自由基($\cdot\text{OH}$)和硫酸根自由基($\cdot\text{SO}_4^-$)等活性物质降解大分子有机污染物和痕量有害化学物

收稿日期: 2018-08-31; 修订日期: 2018-11-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178379); 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2015KTCL-03-15)

作者简介: 孙昕(1971~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为水质污染控制与模拟, E-mail: xinsunn@163.com

质. 近年来通过高级氧化技术去除臭味污染的研究主要有光催化氧化(紫外/臭氧、紫外/氯、紫外/二氧化钛、紫外/过硫酸盐等)、电化学氧化、类芬顿氧化等技术^[12~16]. 过硫酸盐可以通过热、碱、过渡金属、紫外等手段断裂过氧基(O—O)形成高活性硫酸根自由基, 利用硫酸根自由基的强氧化性降解有机物, 在有机废水处理和地下水原位修复等方面已成为高级氧化领域发展的热点^[17,18]. 这是由于过硫酸盐有良好的水溶性, 在室温下稳定存在且成本低, 其活化生成的硫酸根自由基具有极高的氧化还原电位(2.5~3.1 V)和较长的存在时间(3×10^{-5} ~ 4×10^{-5} s)^[19], 在理想条件下能氧化分解绝大多数有机物.

超声技术在微污染原水、难降解高浓度有机废水以及饮用水灭菌消毒等方面已被广泛研究^[20], 其具有反应速率快、设施简单等优点. 超声在水中诱导空化气泡的形成和生长, 气泡破裂时造成局部点的高温(约5 000 K)、高压(约 1×10^8 Pa), 同时此极端条件下水被热解产生·OH与·H, 为有机物降解提供了独特的物理化学环境. 高频超声(850 kHz)已被研究在渔业养殖循环水中降解 GSM 和 2-MIB 有巨大的应用潜力^[4], 但单独超声处理降解效果差、动力成本高等问题无法忽视. 魏红等^[21]的研究发现过硫酸钾单独处理对诺氟沙星的去除率为 27.17%, 而超声活化后去除率高达 88.64%. Wang 等^[22]的研究也发现超声辐射过硫酸盐降解卡马西平有显著的协同作用. 但目前超声活化过硫酸盐高级氧化技术研究主要集中在有机废水处理方面, 在臭味污染控制方面鲜见报道.

本文以固定超声频率为 40 kHz 的条件下, 研究了超声活化过硫酸盐高级氧化技术对典型致嗅物质 2-MIB 和 GSM 的氧化效果和影响因素, 初步探究了臭味降解的机制, 以期超声/过硫酸盐联用工艺在异味突发时对饮用水保障和渔业养殖的实际应用提供参考.

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 仪器与设备

气相色谱质谱联用仪(7890A/7000B, 美国 Agilent); 吹扫捕集浓缩仪(Stratum PTC, 美国 Tekmar); 超纯水系统(pure-lab Option R7 + Ultra Genetic, 英国 ELGA); 超声波清洗仪(KQ500DE, 昆山超声仪器有限公司, 超声功率 500 W, 频率 40 kHz); 电动搅拌机(HD2004W, 上海司乐仪器有限公司); pH 计(HQ30d, 美国 HACH); 总有机碳分

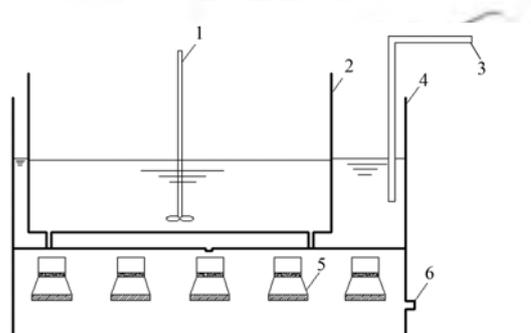
析仪(TOC-L, 日本岛津).

1.1.2 标准物质与试剂

2-甲基异茨醇(2-methylisoborneol, 2-MIB) & 土臭素(geosmin, GSM): Sigma-Aldrich 公司, 混标 $100 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$; 腐殖酸钠: Sigma-Aldrich 公司, 溶于去离子水后经 $0.45 \mu\text{m}$ 玻璃纤维膜过滤得到储备溶液; 过硫酸钾(优级纯), 甲醇(色谱纯), 叔丁醇、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠(分析纯, 天津市科密欧化学试剂有限公司).

1.2 实验装置

采用自制长方体有机玻璃反应器, 反应器置于超声清洗仪固定位置(图 1). 本实验开始时同步开启电动搅拌桨, 确保实验过程中溶液混合均匀, 附加循环水浴以保证反应在室温下进行.



1. 电动搅拌桨; 2. 反应器外壁; 3. 恒温循环水入口; 4. 超声仪外壁; 5. 超声换能器; 6. 恒温循环水出口

图 1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental set-up

1.3 实验方法

反应前超声清洗仪提前开启预热 15 min, 以保证反应过程中的超声稳定性. 用去离子水配制一定浓度的致嗅物质混标溶液 1 L, 根据不同的实验条件投加一定浓度物质后搅拌均匀. 固定反应时间为 15 min, 分别取反应 0、2.5、5、7.5、10、15 min 时水样 20 mL 测定致嗅物质浓度.

溶液的 pH 值均使用 $2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的磷酸盐缓冲溶液调节, 如无特殊说明反应体系 pH 值均维持在 7.05 ± 0.05 . 过硫酸钾浓度采用碘量法^[23]测定; 超声波浴的声强用量热法^[24]进行校准, 即假定进入反应器的所有声能都作为热量消散.

1.4 仪器设置条件

典型致嗅物质的定量分析使用吹扫捕集-气相色谱质谱联用法进行测定.

吹扫捕集条件: 六通阀温度 50°C , 传输线温度 115°C , 样品吹扫温度 60°C ; 吹扫时间 11 min, 流量 $40 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$; 解吸温度 250°C , 时间 3 min; 烘烤温度 280°C , 时间 2 min, 流量 $200 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$.

色谱、质谱条件: 色谱柱型号 Agilent HP-5MS;

进样口温度 280℃; 进样采用分流模式, 分流比 5:1; 柱箱升温程序: 50℃ 保持 1 min, 以 10℃·min⁻¹ 升到 200℃, 保持 1 min, 以 20℃·min⁻¹ 升到 220℃ 保持 1 min. EI 离子源温度为 230℃, 四级杆温度 150℃, 使用选择离子监测 (SIM) 模式测定, 2-MIB 的监测离子为 95 和 107, GSM 的监测离子为 112 和 125.

1.5 方法检出限和加标回收率

将臭味混标溶液稀释为 5 ng·L⁻¹, 重复测定 6 次, 得到 2-MIB 和 GSM 的方法检出限分别为 1.63 ng·L⁻¹ 和 1.08 ng·L⁻¹; 在加标浓度分别为 100、

200、400 ng·L⁻¹ 的条件下平行实验 6 次, 得到 2-MIB 和 GSM 的平均加标回收率分别为 91.4% ~ 107.3% 和 90.8% ~ 105.5%.

2 结果与讨论

2.1 单独 PS、单独 US 和 US/PS 联用工艺比较

考察了单独超声 (US)、单独过硫酸盐 (PS)、超声/过硫酸盐 (PS/US) 联用技术对 2-MIB 和 GSM 的去除效果. 具体实验条件: 典型臭味混标初始浓度为 400 ng·L⁻¹, PS 浓度 2 mmol·L⁻¹, US 声强为 0.53 W·cm⁻², 结果如图 2 所示.

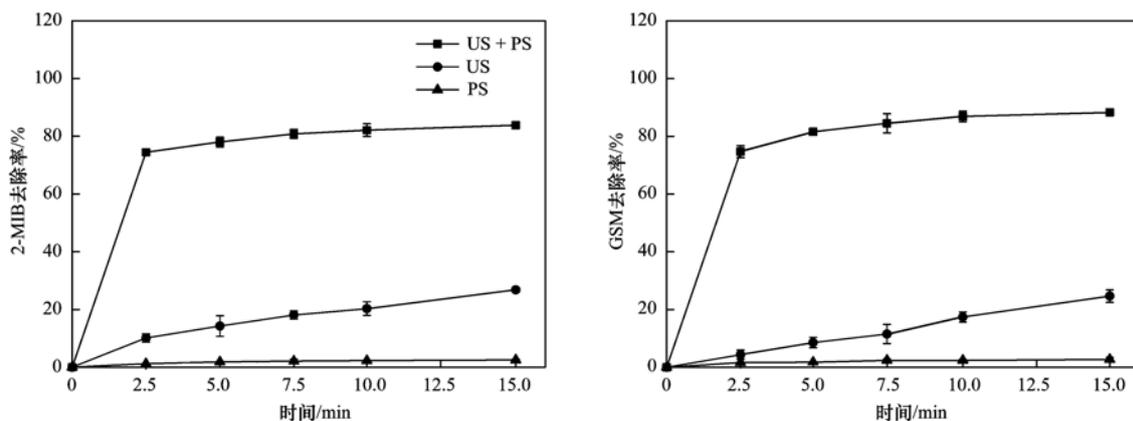
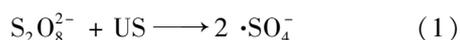


图 2 不同氧化条件下 2-MIB 和 GSM 的降解效果

Fig. 2 Efficiency of the removal of 2-MIB and GSM under different oxidation conditions

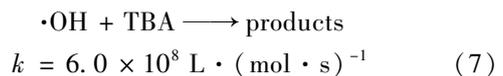
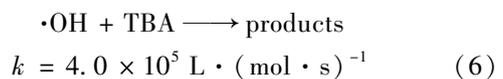
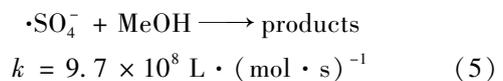
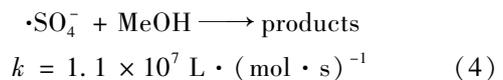
单独 PS 处理对 2-MIB 与 GSM 几乎没有去除效果, 表明典型致嗅物质难以被过硫酸盐直接氧化; 单独 US 辐射处理对 2-MIB 和 GSM 的去除率分别为 26.81% 和 24.65%, 该结果与 Nam-Koong 等^[4] 的研究低频超声 (20 kHz) 处理循环养殖水中典型臭味所得的结论相类似. 有学者通过羟基自由基清除剂实验表明, 单独超声 (640 kHz) 降解典型臭味主要为超声诱导的热解作用而非自由基贡献^[25].

同条件下, US/PS 联用处理对 2-MIB 和 GSM 的去除率分别为 83.80% 和 88.28%, 与单独超声处理相比, 去除率分别提高了 57.0% 和 63.6%. 整个反应体系中超声辐射会导致局部温度和压力骤升, 从而激活了过硫酸盐, 且在均相系统中引起强烈机械效应增强溶液中的传质作用, 加速 PS 分解和 $\cdot\text{SO}_4^-$ 生成, $\cdot\text{SO}_4^-$ 在一定条件下转化生成 $\cdot\text{OH}$, 如反应方程式 (1) ~ (3) 所示^[26,27]. 可以看出单一过硫酸盐体系和单一超声系统之间发生协同效应, 这可能是反应体系中生成了强氧化性的自由基 ($\cdot\text{SO}_4^-$ 、 $\cdot\text{OH}$) 使臭味快速降解.



2.2 甲醇和叔丁醇的影响

已知甲醇 (MeOH) 和叔丁醇 (TBA) 都是典型的自由基清除剂, 但甲醇和叔丁醇与 $\cdot\text{OH}$ 和 $\cdot\text{SO}_4^-$ 反应速率不同, 如反应方程式 (4) ~ (7) 所示^[13].



因此反应体系中分别加入甲醇和叔丁醇可探究 US/PS 联用工艺两种自由基对 2-MIB 与 GSM 的降解机制. 在典型臭味混标浓度 400 ng·L⁻¹, PS 浓度 2 mmol·L⁻¹, 超声声强 0.53 W·cm⁻², pH 为 7.05 条件下, 研究分别加入甲醇 (2 mmol·L⁻¹) 和叔丁醇 (2 mmol·L⁻¹) 时, 降解臭味的效果如图 3 所示.

当叔丁醇加入反应体系中, 竞争消耗 $\cdot\text{OH}$ 使 2-MIB 与 GSM 降解受到抑制, 去除率从 83.80% 和 88.82% 降为 73.17% 和 74.56%; 当甲醇加入后抑

制效果更为明显, 因为甲醇同时捕捉体系中的 $\cdot\text{OH}$ 和 $\cdot\text{SO}_4^-$, 嗅味降解速率减慢, 使去除率降为 53.95% 和 47.36%. 但对比单独 US 处理, US/PS 体系中加入叔丁醇和甲醇后 2-MIB 与 GSM 去除率仍保持较高水平, 可能是自由基清除剂量不足以将 $\cdot\text{OH}$ 和 $\cdot\text{SO}_4^-$ 完全淬灭. 马京帅等^[28]研究热激活过硫酸盐降解普萘洛尔时也发现乙醇和叔丁醇在低浓度($60\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)条件下对体系中自由基抑制效果不明显. 以上结果分析可得 US/PS 体系中典型嗅味

的降解为 $\cdot\text{OH}$ 和 $\cdot\text{SO}_4^-$ 共同作用. GSM 比 2-MIB 降解抑制效果更明显, 即 GSM 更容易被自由基破坏降解, 其与自由基有较高的反应速率, 这是由于 2-MIB 化学结构比 GSM 稳定^[12].

相同实验条件下改变反应体系中 pH 值分别为 5.39、7.05、8.72, 研究不同 pH 条件下致嗅物质的降解效果以及甲醇 ($2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) 和叔丁醇 ($2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) 加入后对嗅味去除的影响, 结果如图 4 所示.

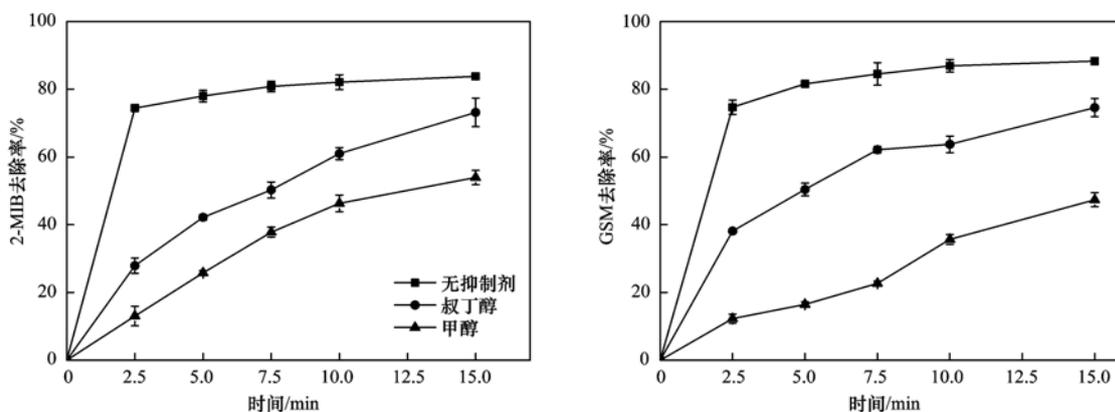


图 3 超声/过硫酸盐体系下不同自由基清除剂对 2-MIB 和 GSM 的降解影响

Fig. 3 Effect of different free radical scavengers on the degradation of 2-MIB and GSM using the US/PS system

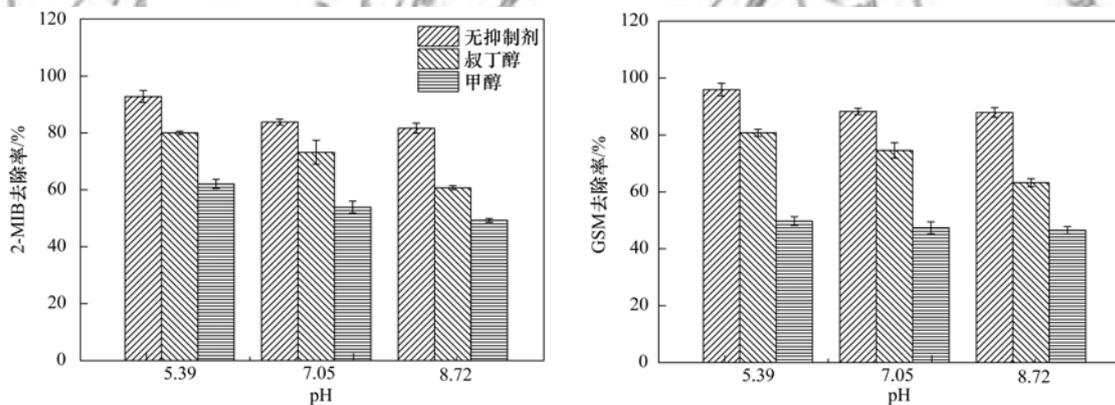


图 4 不同 pH 条件下超声/过硫酸盐体系中存在不同的自由基清除剂

Fig. 4 Different free radical scavengers in ultrasonic/persulfate systems at different pH conditions

自由基清除剂未加入时, 酸性条件下比碱性条件下 2-MIB 和 GSM 的去除率分别高 11.13% 和 8.01%. 当甲醇存在时, 在 pH 为 5.39、7.05 和 8.72 的条件下 2-MIB 去除率分别为 62.08%, 53.95% 和 49.30%, 同条件下叔丁醇存在时 2-MIB 去除率分别为 80.01%, 73.17% 和 60.76%. GSM 的降解也得到类似结果. 不同 pH 条件下, 两种自由基清除剂加入体系中嗅味分解均被明显抑制, 且甲醇抑制作用始终高于叔丁醇, 这与 Xie 等^[13]的研究紫外活化过硫酸盐降解典型致嗅物质结果相一致. 叔丁醇在 pH 为 8.72 条件下抑制嗅味降解更为明显, 这表明 US/PS 体系中羟基自由基在碱性条件

下为主要活性物质, 而硫酸根自由基主要存在于酸性和中性条件下.

2.3 影响 US/PS 降解嗅味物质的因素

2.3.1 过硫酸盐浓度的影响

作为活性自由基源的过硫酸盐浓度是评价氧化过程效率的重要因素. 在控制反应体系 2-MIB 和 GSM 浓度为 $400\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 超声声强为 $0.53\text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 条件下, 分别考察了初始 PS 浓度为 0.25、0.5、1、 $2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时致嗅物质的降解效果, 结果如图 5 所示.

结果显示, 随着过硫酸盐剂量从 $0.25\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 $2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, 2-MIB 和 GSM 去除

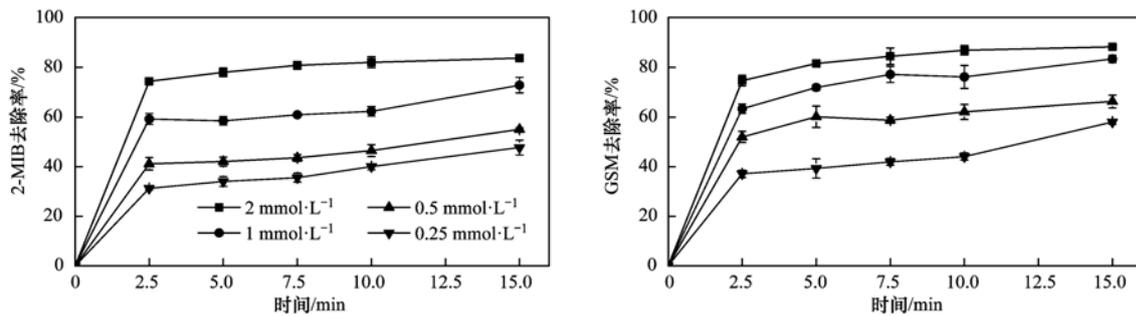


图5 不同过硫酸盐浓度下2-MIB和GSM的去除效果

Fig. 5 Efficiency of the removal of 2-MIB and GSM under different persulfate concentrations

率分别从 47.69% 和 58.02% 增加到 83.80% 和 88.28%。这表明较高的过硫酸盐浓度被超声激活产生了更多的 $\cdot\text{SO}_4^-$ 加快了臭味降解,与Chen等^[29]研究超声活化过硫酸盐去除废水中二硝基甲苯得到的结论相一致。但过硫酸盐投加量过大会导致水体中硫酸根离子增多,在实际应用中应在保证出水水质臭味达标的前提下,选择合理的过硫酸盐投加量。

图6显示了初始过硫酸盐浓度变化对臭味总去除量和单位质量过硫酸盐降解典型臭味的影响。随

着初始PS浓度的增加,2-MIB和GSM总去除量增加。初始PS浓度为 $0.25\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,每单位PS的2-MIB和GSM平均去除质量为 $2.82\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$ 和 $3.43\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$,而当PS浓度为 $2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,平均去除质量为 $0.62\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$ 和 $0.65\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$ 。随着PS初始浓度增加,US/PS体系中 $\cdot\text{SO}_4^-$ 产率降低。这可能由于硫酸根自由基发生重组、两种自由基与过量PS反应被消耗,如反应方程式(8)~(10)所示^[30]。

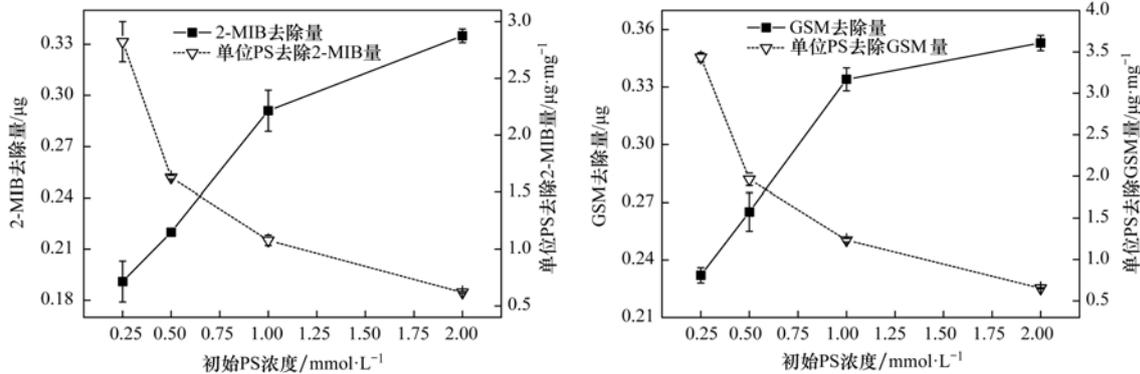
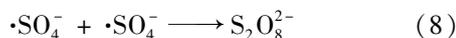


图6 初始过硫酸盐浓度对GSM和2-MIB去除量的影响以及单位过硫酸盐的去除量

Fig. 6 Effect of the initial persulfate concentration on the quantity of GSM and 2-MIB removed and the quantity removed per unit persulfate



2.3.2 超声功率的影响

在控制典型臭味混标初始浓度为 $400\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,PS浓度为 $2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$,分别考察超声输入功率为500、400、300、200 W条件下2-MIB和GSM的降解效果,量热法校正后对应的声强分别为0.53、0.47、0.36、0.33 $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$,结果如图7所示。随着声强增大,2-MIB和GSM的去除率分别由69.92%和72.37%增加到83.80%和88.28%,说明增大超声声强可以促进致臭物质的降解。声音强度由振动幅度的大小决定,有研究表明较高超声振幅更容易激活PS产生较多的自由基^[31],同时在均相体系中引起更为剧烈的机械作用可以增强溶液中的传质效

果来促进臭味降解。

2.3.3 臭味初始浓度的影响

在湖库水源水及水产养殖中,典型致臭物质受水华等影响不同季节浓度变化较大。在体系中PS浓度 $2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$,超声声强为 $0.53\text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$,考察了US/PS联用工艺分别对典型臭味混标初始浓度为100、200、400、600、800 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 条件下的去除效果,结果如图8所示。在100~800 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内US/PS高级氧化技术均有良好的降解效果,初始臭味在低浓度时有更高的去除率。初始臭味浓度为100 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 时2-MIB和GSM去除率可达88.73%和93.32%,而800 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 时去除率为76.69%和84.64%。而这可能是因为在低浓度条件下自由基生成率高于2-MIB与GSM降解的消耗率,导致更高的去除率。而高浓度臭味初始臭味浓度去除率较

低,可能是由于反应位点的数量有限和反应体系中

自由基的有限可用性.

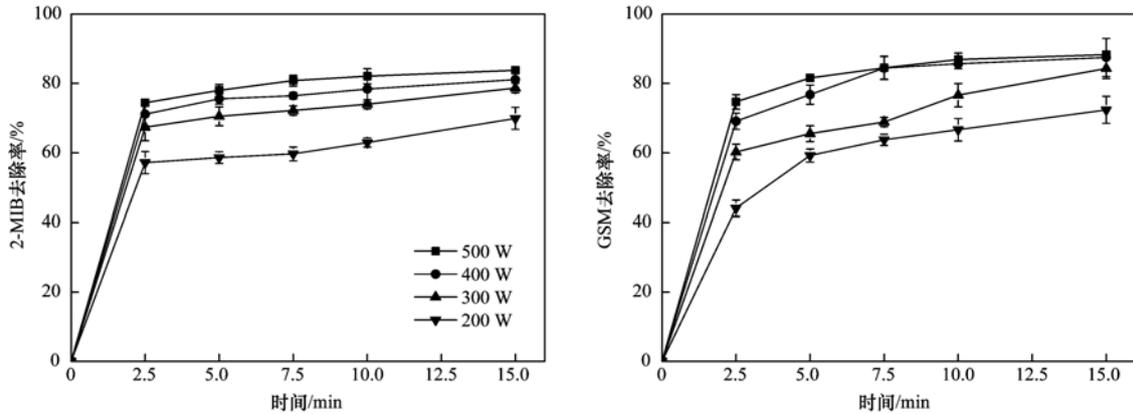


图7 超声波功率对2-MIB和GSM去除效果的影响

Fig. 7 Effect of ultrasonic power input on the removal efficiency of 2-MIB and GSM

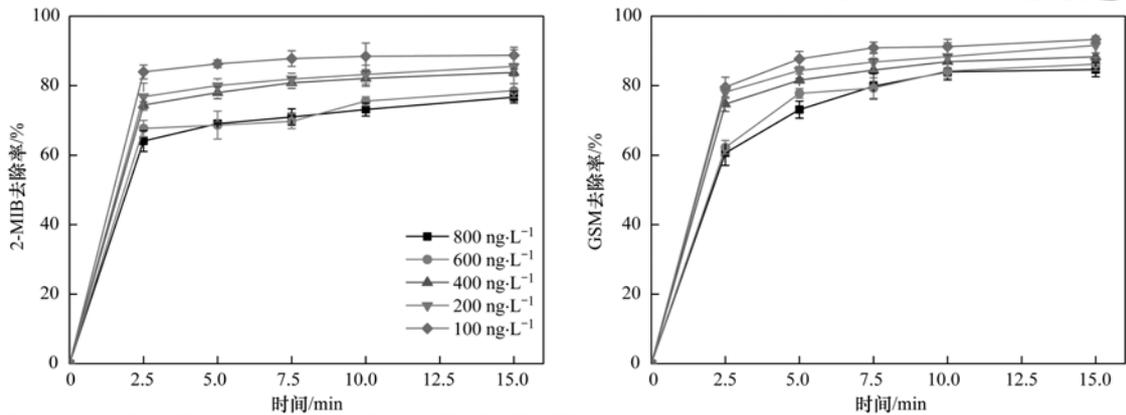


图8 不同嗅味初始浓度下2-MIB与GSM的降解效果

Fig. 8 Degradation of 2-MIB and GSM at different initial concentrations of the odors

2.3.4 腐殖酸的影响

天然有机物在原水中广泛存在,主要为腐殖酸,其存在对水处理效能有一定影响^[32].在控制2-MIB和GSM混标溶液初始浓度为400 ng·L⁻¹,PS浓度2 mmol·L⁻¹,超声声强为0.53 W·cm⁻²条件下,分别研究反应体系中投加1、2、4和8 mg·L⁻¹的腐殖酸(相应TOC值分别为

0.60、0.89、1.48和2.39 mg·L⁻¹)时对典型致嗅物质去除效果的影响,如图9所示.随着腐殖酸浓度的增加,2-MIB和GSM的去除率减小,当腐殖酸浓度为8 mg·L⁻¹时,2-MIB和GSM的去除率下降11.18%和10.91%.这是由于腐殖酸的存在会竞争消耗自由基,抑制了嗅味降解.对比孙昕等^[33]研究真空紫外激活过硫酸盐去除水

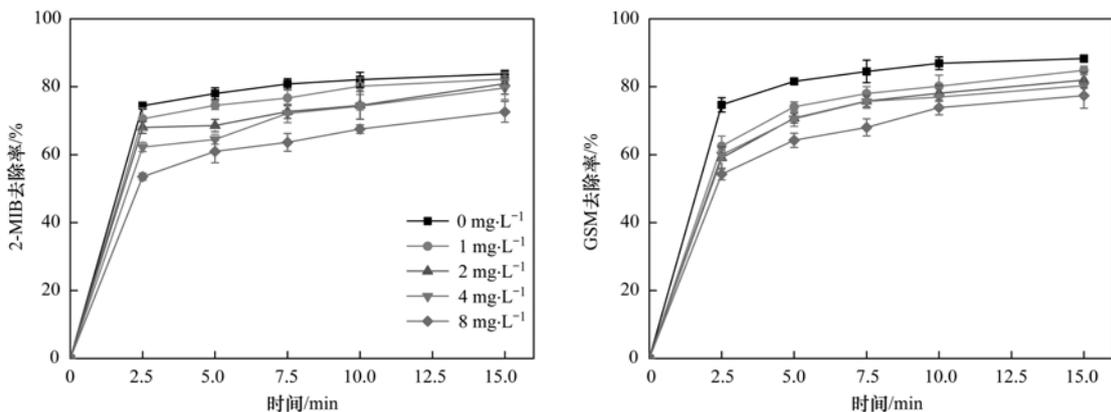


图9 不同腐殖酸浓度条件下2-MIB和GSM的去除效果

Fig. 9 Removal efficiency of 2-MIB and GSM in the presence of different humic acid concentrations

中典型臭味, US/PS 体系受水体中的天然有机物影响较小, 这是因为腐殖酸色度显著影响紫外的穿透性从而削弱了过硫酸盐激活效果, 而超声几乎不受色度影响, 激活过硫酸盐效果好。此外, 有学者研究表明循环养殖水中有机与无机负荷存在对超声降解典型致嗅物质影响极小^[4]。

3 结论

(1) 单独过硫酸盐处理基本不能去除水中典型致嗅物质, 单独超声(40 kHz)处理去除效果较差, 但采用 US/PS 高级氧化技术在短时间对典型臭味有较理想的去除效果。

(2) US/PS 联用工艺处理低浓度(100 ng·L⁻¹) 典型致嗅物质有更高的去除率, 且体系中增加过硫酸盐投加量和超声波声强可提高反应速率, 此外原水中的腐殖酸会抑制典型致嗅物质降解但影响效果较小。在实际工艺运行中可通过调整适宜条件使臭味降解效果达到最优。

(3) 超声活化过硫酸盐高级氧化技术中, 对致嗅物质的去除主要为硫酸根自由基和羟基自由基共同作用的结果, 其中硫酸根自由基在酸性和中性条件下降解典型臭味起主导作用。

参考文献:

- [1] Su M, Yu J W, Zhang J Z, *et al.* MIB-producing cyanobacteria (*Planktothrix* sp.) in a drinking water reservoir: distribution and odor producing potential[J]. *Water Research*, 2015, **68**: 444-453.
- [2] 张旭东, 张学博, 刘畅, 等. 天津滨海新区自来水臭味事件成因分析及应急处理[J]. *中国给水排水*, 2017, **33**(13): 46-49.
Zhang X D, Zhang X B, Liu C, *et al.* Cause for odor problem and its emergent treatment in Tianjin Binhai New Area [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, **33**(13): 46-49.
- [3] Dietrich A M, Phetxumphou K, Gallagher D L. Systematic tracking, visualizing, and interpreting of consumer feedback for drinking water quality[J]. *Water Research*, 2014, **66**: 63-74.
- [4] Nam-Koong H, Schroeder J P, Petrick G, *et al.* Removal of the off-flavor compounds geosmin and 2-methylisoborneol from recirculating aquaculture system water by ultrasonically induced cavitation[J]. *Aquacultural Engineering*, 2016, **70**: 73-80.
- [5] Lee J, Rai P K, Jeon Y J, *et al.* The role of algae and cyanobacteria in the production and release of odorants in water [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **227**: 252-262.
- [6] Qi M, Chen J, Sun X X, *et al.* Development of models for predicting the predominant taste and odor compounds in Taihu Lake, China[J]. *PLoS One*, 2012, **7**(12): e51976.
- [7] 焦洁, 陆纳新, 王海湧, 等. 太湖原水藻类代谢产物中臭味物质的去除技术研究[J]. *中国给水排水*, 2016, **32**(11): 64-67.
Jiao J, Lu N X, Wang H Y, *et al.* Removal of odorous substances from algae metabolites in raw water of Taihu Lake[J]. *China Water & Wastewater*, 2016, **32**(11): 64-67.
- [8] Yu J W, Yang F C, Hung W N, *et al.* Prediction of powdered activated carbon doses for 2-MIB removal in drinking water treatment using a simplified HSDM approach[J]. *Chemosphere*, 2016, **156**: 374-382.
- [9] 翁皓琳, 肖冠芳, 葛孝新, 等. 高密孚日水厂化学预氧化法去除嗅味物质研究[J]. *环境科学与技术*, 2016, **39**(S1): 247-250, 289.
Weng H L, Xiao G F, Ge X X, *et al.* Removal effect of taste and odor for chemical preoxidation of sunvim water plant in Gaomi [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **39**(S1): 247-250, 289.
- [10] Azaria S, Nir S, Van Rijn J. Combined adsorption and degradation of the off-flavor compound 2-methylisoborneol in sludge derived from a recirculating aquaculture system [J]. *Chemosphere*, 2017, **169**: 69-77.
- [11] Kim C, Lee S II, Hwang S, *et al.* Removal of geosmin and 2-methylisoborneol (2-MIB) by membrane system combined with powdered activated carbon (PAC) for drinking water treatment [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2014, **4**: 91-98.
- [12] Antonopoulou M, Evgenidou E, Lambropoulou D, *et al.* A review on advanced oxidation processes for the removal of taste and odor compounds from aqueous media[J]. *Water Research*, 2014, **53**: 215-234.
- [13] Xie P C, Ma J, Liu W, *et al.* Removal of 2-MIB and geosmin using UV/persulfate: contributions of hydroxyl and sulfate radicals[J]. *Water Research*, 2015, **69**: 223-233.
- [14] Yaparate S, Tripp C P, Amirbahman A. Photodegradation of taste and odor compounds in water in the presence of immobilized TiO₂-SiO₂ photocatalysts [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, **346**: 208-217.
- [15] Bu L J, Zhou S Q, Shi Z, *et al.* Removal of 2-MIB and geosmin by electrogenerated persulfate: performance, mechanism and pathways[J]. *Chemosphere*, 2017, **168**: 1309-1316.
- [16] Park J A, Nam H L, Choi J W, *et al.* Oxidation of geosmin and 2-methylisoborneol by the photo-Fenton process: kinetics, degradation intermediates, and the removal of microcystin-LR and trihalomethane from Nak-Dong River water, South Korea [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, **313**: 345-354.
- [17] Waclawek S, Lutze H V, Grübel K, *et al.* Chemistry of persulfates in water and wastewater treatment: a review [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, **330**: 44-62.
- [18] Matzek L W, Carter K E. Activated persulfate for organic chemical degradation: a review[J]. *Chemosphere*, 2016, **151**: 178-188.
- [19] Ghanbari F, Moradi M, Gohari F. Degradation of 2, 4, 6-trichlorophenol in aqueous solutions using peroxydisulfate/activated carbon/UV process via sulfate and hydroxyl radicals [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2016, **9**: 22-28.
- [20] 蒋昊琳, 刘立新, 杨明全, 等. 超声波在水处理中的应用与研究现状[J]. *化工进展*, 2017, **36**(S1): 464-468.
Jiang H L, Liu L X, Yang M Q, *et al.* Application and research status of ultrasound in water treatment [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2017, **36**(S1): 464-468.
- [21] 魏红, 史京转, 李佳霖, 等. 超声、过硫酸钾协同去除水中诺氟沙星的效果[J]. *环境科学*, 2015, **36**(11): 4121-4126.
Wei H, Shi J Z, Li J L, *et al.* Norfloxacin solution degradation under ultrasound, potassium persulfate collaborative system [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(11): 4121-4126.
- [22] Wang S L, Zhou N. Removal of carbamazepine from aqueous solution using sono-activated persulfate process [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, **29**: 156-162.
- [23] Liang C J, Huang C F, Mohanty N, *et al.* A rapid

- spectrophotometric determination of persulfate anion in ISCO[J]. *Chemosphere*, 2008, **73**(9): 1540-1543.
- [24] Chakma S, Moholkar V S. Investigations in synergism of hybrid advanced oxidation processes with combinations of sonolysis + Fenton process + UV for degradation of bisphenol A [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, **53**(16): 6855-6865.
- [25] Song W H, O'Shea K E. Ultrasonically induced degradation of 2-methylisoborneol and geosmin [J]. *Water Research*, 2007, **41**(12): 2672-2678.
- [26] Darsinou B, Frontistis Z, Antonopoulou M, *et al.* Sono-activated persulfate oxidation of bisphenol A; kinetics, pathways and the controversial role of temperature [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, **280**: 623-633.
- [27] Ji Y F, Dong C X, Kong D Y, *et al.* Heat-activated persulfate oxidation of atrazine; Implications for remediation of groundwater contaminated by herbicides [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, **263**: 45-54.
- [28] 马京帅, 吕文英, 刘国光, 等. 热活化过硫酸盐降解水中的普萘洛尔[J]. *环境化学*, 2017, **36**(2): 221-228.
Ma J S, Lyu W Y, Liu G G, *et al.* Degradation of propranolol in aqueous solution by heat-activated persulfate [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, **36**(2): 221-228.
- [29] Chen W S, Su Y C. Removal of dinitrotoluenes in wastewater by sono-activated persulfate [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2012, **19**(4): 921-927.
- [30] Monteagudo J M, El-Taliawy H, Durán A, *et al.* Sono-activated persulfate oxidation of diclofenac; degradation, kinetics, pathway and contribution of the different radicals involved [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, **357**: 457-465.
- [31] Peng L P, Wang L, Hu X T, *et al.* Ultrasound assisted, thermally activated persulfate oxidation of coal tar DNAPLs [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, **318**: 497-506.
- [32] Sillanpää M, Ncibi M C, Matilainen A. Advanced oxidation processes for the removal of natural organic matter from drinking water sources: a comprehensive review [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, **208**: 56-76.
- [33] 孙昕, 史路肖, 张焱, 等. 真空紫外/过二硫酸盐去除饮用水中臭味物质 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(5): 2195-2201.
Sun X, Shi L X, Zhang Y, *et al.* Removal of odorants in drinking water using VUV/persulfate [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 2195-2201.



CONTENTS

Source Apportionment and Mixing State of Single Particles in the Nanjing Jiangbei New Area	YU Xing-na, SHI Zheng, MA Jia, <i>et al.</i> (1521)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Pollution in PM _{2.5} in Xi'an	MU Zhen, CHEN Qing-cai, WANG Yu-qin, <i>et al.</i> (1529)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During Winter in Taiyuan	LIU Su, MA Tong, YANG Yan, <i>et al.</i> (1537)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Zhengzhou	YAN Guang-xuan, ZHANG Jing-wen, LEI Hao-jie, <i>et al.</i> (1545)
Elemental Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in a Suburb of Zhuhai City	YANG Yi-hong, JIA Yan, BIAN Guo-jian, <i>et al.</i> (1553)
Impact of a Dust Event on the Size Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosols at a Coastal Region and over the Ocean	JIN Tong-jun, QI Jian-hua, XI Zi-yan, <i>et al.</i> (1562)
CALPUFF Modeling of the Influence of Typical Industrial Emissions on PM _{2.5} in an Urban Area Considering the SOA Transformation Mechanism	GAO Shuang, BO Xin, MA Yan, <i>et al.</i> (1575)
Variation in Pollutant Concentrations and Correlation Analysis with the Vegetation Index in Beijing-Tianjin-Hebei	SUN Shuang, LI Ling-jun, ZHAO Wen-ji, <i>et al.</i> (1585)
Estimation of Coal Consumption and the Emission of Related Contaminants in the Plain Area Around Beijing During 2015-2017	ZHAO Wen-hui, LI Ling-jun, LU Hai-feng, <i>et al.</i> (1594)
Column-integrated Aerosol Optical Properties Determined Using Ground-based Sun Photometry Measurements in the Hangzhou Region	QI Bing, CHE Hui-zheng, XU Ting-ting, <i>et al.</i> (1604)
Speciated VOCs Emission Inventory and Ozone Formation Potential in Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (1613)
Characterization of Volatile Organic Compounds from Cooking Emissions	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, XU Rui-zhe, <i>et al.</i> (1627)
Analysis of Peroxyacetyl Nitrate and Ozone During a Typical Photochemical Pollution Process at the Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (1634)
Characteristics and Interannual Variation of Chemical Components in Typical Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, LI Meng, YAN Xu, <i>et al.</i> (1645)
Sources Analysis and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the PM _{2.5} Fraction of Fugitive Dust in Nanchang City	YU Rui-lian, ZHENG Quan, LIU Xian-rong, <i>et al.</i> (1656)
Methods and Application of Road Fugitive Dust Emission Factor Localization	FAN Shou-bin, YANG Tao, WANG Kai, <i>et al.</i> (1664)
Characterization of Tailpipe Emissions from in-use Excavators	MA Shuai, ZHANG Kai-shan, WANG Fan, <i>et al.</i> (1670)
Microbial Properties of Different Size Aerosols at Human Average Respiratory Height During Fog-haze Days	YANG Tang, HAN Yun-ping, LI Lin, <i>et al.</i> (1680)
Modification and Performance Tests of Visibility Parameterizations for Haze Days	ZHAO Xiu-juan, LI Zi-ming, XU Jing (1688)
Application of Support Vector Machine Regression in Ozone Forecasting	SU Xiao-qian, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1697)
Analysis of PHEV CO ₂ Emission Based on China's Grid Structure and Travelling Patterns in Mega Cities	HAO Xu, WANG He-wu, LI Wei-feng, <i>et al.</i> (1705)
Sources of Nitrate in Groundwater and Its Environmental Effects in Karst Trough Valleys: A Case Study of an Underground River System in the Longfeng Trough Valley, Chongqing	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1715)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Surface Water of Jiaozhou Bay	LIU Cheng, SUN Cui-zhu, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (1726)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Sediments of Zhanjiang Bay	PENG Shi-yun, PENG Ping-an, KONG De-ming, <i>et al.</i> (1734)
Analysis of the Optical Properties and Factors Influencing DOM in an Ecological Purification System: A Case Study of Yanlong Lake in Spring	MA Rui, LI Xuan, WANG Lian, <i>et al.</i> (1742)
Analysis of the Relationship Between Dissolved Organic Matter (DOM) and Watershed Land-use Based on Three-dimensional Fluorescence-Parallel Factor (EEM-PARAFAC) Analysis	LI Yun, WEI Hong-jie, WANG Kan, <i>et al.</i> (1751)
Analysis of the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions from Agricultural Non-point Sources on Hanfeng Lake Basin	XIE Jing-chao, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (1760)
Simulation of the Migration and Leaching of Nitrate Nitrogen in the Farmland Soil Profile in a Hilly Area of Taihang Mountain with the RZWQM Model	ZHENG Wen-bo, WANG Shi-qin, LIU Bing-xia, <i>et al.</i> (1770)
Spatial Distribution Characteristics of Nutrients and Chlorophyll A in the Lancang River Basin Under Cascade Reservoirs	CHENG Bao, WANG Xue, MA Jin-chuan, <i>et al.</i> (1779)
Nutrient Distribution of Overlying Water in Tidal Marshes in Five Estuaries and Bays of the Fuzhou Region in Autumn	HE Lu-lu, YANG Ping, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (1788)
Distribution and Environmental Risk of Pharmaceutically Active Compounds in the Traditionally Aqueous Phase of Effluent-receiving Rivers	WANG Shuo, LIU Jian-chao, ZHENG Chao-ya, <i>et al.</i> (1797)
Effects of a Green Roof on Stormwater Regulation and Cost-benefit Analysis	LI Jun-sheng, YIN Hai-wei, KONG Fan-hua, <i>et al.</i> (1803)
Ultrasonically Activated Persulfate Degrades Typical Odors in Water	SUN Xin, SUN Jie, LI Peng-fei, <i>et al.</i> (1811)
Metal Organic Framework MIL-53(Fe) as a Photocatalyst for Visible-light Catalytic Reduction of U(VI) in Aqueous Solution	YAN Zeng-yuan, XI Hai-ling, YUAN Li-yong (1819)
Effects and Differences of the Release of Dissolved Organic and Inorganic Phosphorus in Different Sediments Covered by Different Materials of Erhai Lake	GONG Jia-jian, NI Zhao-kui, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (1826)
Phosphate Removal Using Rice Husk Biochars Modified with Lanthanum Hydroxide	XU Run, SHI Cheng-hao, TANG Qian, <i>et al.</i> (1834)
Characteristics and Heavy Metal Adsorption Performance of Sewage Sludge-derived Biochar from Co-pyrolysis with Transition Metals	CHEN Tan, ZHOU Ze-yu, MENG Rui-hong, <i>et al.</i> (1842)
Adsorption, Reclaim, and Regeneration of Cd by Magnetic Calcium Dihydrogen Phosphate Nanoparticles	LI Yu-jiao, YANG Zhi-min, CHEN Yu-cheng, <i>et al.</i> (1849)
Effect of Hematite on the Inhibition of Hydrogen Sulfide Formation and Its Mechanism During Anaerobic Digestion and Methanogenesis of Sulfate Wastewater	HUANG Shao-fu, YE Jie, ZHOU Shun-gui (1857)
Pollutant Removal Performance and Membrane Fouling Characteristics in Marine Aquaculture Wastewater Treatment by a Microalgae Membrane Reactor	MA Hang, LI Zhi-peng, LIU Feng, <i>et al.</i> (1865)
Pre-precipitation of Sewage-SNAD Granular Sludge Process Test	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (1871)
Impact of Actual Domestic Sewage and Simulated Wastewater on an Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WANG Ying-qiao, LI Shuai, <i>et al.</i> (1878)
Nitrogen Removal Performance of a Sulfur/Pyrite Autotrophic Denitrification System	ZHOU Ya, MAI Wen-ning, LIANG Jia-wei, <i>et al.</i> (1885)
Nitrogen Removal by Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas putida</i> YH and Its Kinetic Characteristics	WANG Xu-hui, YANG Lei, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (1892)
Effect of Sludge Retention Time and pH on the Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, HUANG Hui-min, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (1900)
Microbial Community of Granular Sludge in an ANAMMOX-EGSB Reactor Under Saline Conditions	WANG Han, LI Han-xiang, CHEN You-peng, <i>et al.</i> (1906)
Effect of Intracellular Carbon Source (PHA) Storage on the Mixed Growth Microbial Community Resistance to Low Temperature	YANG Jian-peng, ZHANG Jian, TIAN Qing, <i>et al.</i> (1914)
Contents and Forms of Phosphorus in the Municipal Sewage Sludge of China	WANG Chao, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (1922)
Contamination Characteristics and Safety Risk Assessment of Perfluorinated Alkylated Substances in Aquatic Products from Guangzhou	WANG Xu-feng, WANG Qiang, LI Zhi-guang, <i>et al.</i> (1931)
Characteristics of the Dissolved Nitrous Oxide (N ₂ O) Concentrations and Influencing Factors in a Representative Agricultural Headwater Stream in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, HU Lei, <i>et al.</i> (1939)
CH ₄ Uptake in Different Saline-alkaline Soils in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia	YANG Wen-zhu, JIAO Yan, YANG Ming-de, <i>et al.</i> (1950)
Allocation and Stabilization Responses of Rice Photosynthetic Carbon in the Plant-Soil System to Phosphorus Application	WANG Ying-ying, XIAO Mou-liang, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (1957)
Effect of Soil Moisture and Temperature on the Soil Inorganic Carbon Release of Brown Limestone Soil in the Karst Region of Southwestern China	XU Xue-chi, HUANG Yuan, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1965)
Temporal and Spatial Dynamics of Soil Microbial Biomass Carbon and Its Influencing Factors on an Eroded Slope in the Hilly Loess Plateau Region	QIN Qian, ZHU Shi-shuo, XIA Bin, <i>et al.</i> (1973)
Composition, Characteristics, and Accumulation of Antibiotics in the Soil in Agricultural Land	KONG Chen-chen, ZHANG Shi-wen, NIE Chao-jia, <i>et al.</i> (1981)
VOCs and Odors Control and Development in Pharmaceutical Fermentation Industry	WANG Dong-sheng, ZHU Xin-meng, YANG Xiao-fang, <i>et al.</i> (1990)