

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第5期

Vol.39 No.5

**2018**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

餐饮行业细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)排放测算方法:以上海市为例 ..... 王红丽, 景盛翱, 楼晟荣, 陶士康, 乔利平, 李莉, 黄成, 林立, 陈长虹 (1971)

上海夏季PM<sub>2.5</sub>中有机物的组分特征、空间分布和来源 ..... 高雅琴, 王红丽, 景盛翱, 乔利平, 李莉, 朱书慧, 楼晟荣, 陶士康, 冯加良, 李想, 陈长虹 (1978)

北京南郊区PM<sub>2.5</sub>中水溶性无机盐季节变化及来源分析 ..... 高韩钰, 魏静, 王跃思 (1987)

基于样方法的天津市春季道路扬尘PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子特征及来源解析 ..... 赵静琦, 姬亚芹, 张蕾, 王士宝, 李越洋 (1994)

广州秋季HONO污染特征及夜间来源分析 ..... 田智林, 杨闻达, 虞小芳, 张曼曼, 张贺伟, 程丁, 程鹏, 王伯光 (2000)

基于硫氧同位素研究南京北郊夏季大气中硫酸盐来源及氧化途径 ..... 韩珣, 任杰, 陈善莉, 王瑾瑾, 沈潇雨, 魏英, 郭照冰, 朱彬 (2010)

区县尺度机动车高分辨率排放清单建立方法及应用 ..... 樊守彬, 郭津津, 李雪峰 (2015)

典型工业生物质锅炉多环芳烃排放特征 ..... 林玉君, 白莉, 王焕香, 肖文, 刘军, 向运荣, 张春林 (2023)

多时间尺度HSPF模型参数不确定性研究 ..... 庞树江, 王晓燕, 马文静 (2030)

氮氧同位素联合稳定同位素模型解析水源地氮源 ..... 金赞芳, 张文辽, 郑奇, 朱晨阳, 李非里 (2039)

白洋淀水体挥发性有机物污染特征与风险评价 ..... 高秋生, 赵永辉, 焦立新, 田自强, 杨柳, 杨苏文, 崔志丹, 郝子峰 (2048)

太湖颗粒态有机质的荧光特征及环境指示意义 ..... 吕伟伟, 姚昕, 张保华, 刘延龙, 李元鹏 (2056)

长江口滩涂表层沉积物中微塑料的分布及沉降特点 ..... 朱晓桐, 衣俊, 强丽媛, 程金平 (2067)

桂林五里峡水库丰水期溶解有机碳特征 ..... 卢晓漩, 李强, 靳振江, 彭文杰, 房君佳, 黄炳惠, 宋昂 (2075)

青藏高原多年冻土区典型植被下河流溶解性有机碳的生物可利用性 ..... 马小亮, 刘桂民, 吴晓东, 徐海燕, 叶琳琳, 张晓兰, 白炜 (2086)

城郊与城镇河流中溶解性有机质与重金属的相关性 ..... 梁梦琦, 邵美玲, 曹昌丽, 纵亚男, 唐剑锋 (2095)

溶解性有机质在岩溶水系统中的迁移转化及影响因素分析 ..... 张连凯, 刘朋雨, 覃小群, 单晓静, 刘文, 赵振华, 姚昕, 邵明玉 (2104)

三峡库区澎溪河回水区溶解态金属离子来源和时空分布特征分析 ..... 赵晓松, 蔚建军, 付莉, 姜伟, 周川, 李波, Douglas Haffner, Christopher Weisener, 张磊 (2117)

澜沧江流域沉积物间隙水-上覆水营养盐特征与交换通量分析 ..... 望雪, 程豹, 杨正健, 刘德富, 徐雅倩 (2126)

蓄水期三峡水库香溪河沉积物-水系统营养盐分布特征 ..... 苏青青, 刘德富, 纪道斌, 宋林旭, 崔玉洁, 李欣, 陈秀秀, 刘心愿 (2135)

两种水生植物对上覆水和间隙水中各形态磷的影响 ..... 杨文斌, 高顺峰, 万锐, 孙祥, 王赢 (2145)

于桥水库沉积物-水界面氮磷剖面特征及交换通量 ..... 文帅龙, 龚琬晴, 吴涛, 郑小兰, 江雪, 李鑫, 钟继承 (2154)

岷江干流表层沉积物中磷形态空间分布特征 ..... 杨耿, 秦延文, 韩超南, 马迎群, 刘志超, 杨晨晨 (2165)

农业排水沟渠硝态氮吸收动力学特征及相关性分析 ..... 李如忠, 殷齐贺, 高苏蒂, 陈广州 (2174)

不同合成条件对ZnAl-LDHs覆膜改性生物陶粒除磷效果的影响 ..... 向洋, 张翔凌, 雷雨, 方晨佳, 袁野, 姜应和, 徐舟影 (2184)

真空紫外/过二硫酸盐去除饮用水中嗅味物质 ..... 孙昕, 史路肖, 张燧, 杨煜, 唐晓 (2195)

石墨烯负载铁锰氧化物活化过一硫酸盐降解金橙G ..... 夏文君, 刘锋, 郝尚斌, 黄天寅, 王忠明, 陈家斌 (2202)

载镧或铈生物炭吸附水体中As(V)的作用机制 ..... 李锦, 祖艳群, 李刚, 孙国新 (2211)

DOM不同相对分子质量组分在无机矿物上的吸附及其对卡马西平吸附的影响实验 ..... 梁雨, 何江涛, 张思 (2219)

污水处理厂中有机磷阻燃剂的污染特征 ..... 孙佳薇, 丁炜楠, 张占恩, 王俊霞, 顾海东 (2230)

低温污水前置强化混凝 ..... 刘海龙, 任宇霞, 张忠民 (2239)

印染废水反渗透脱盐系统运行性能及膜污堵特性 ..... 谭玉琚, 张泽田, 吴乾元, 姚颖, 胡洪营, 丘培文 (2249)

生物膜CANON反应器性能的优化:从FBRR到MBBR ..... 付昆明, 李慧, 周厚田, 仇付国 (2256)

两次污泥颗粒化过程中微生物群落的动态变化 ..... 高景峰, 张丽芳, 张树军, 高永青, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲 (2265)

铝、铁、钛3种金属盐基混凝剂调理污泥的性能比较 ..... 王晓萌, 王鑫, 杨明辉, 张淑娟 (2274)

热、热碱处理对污泥溶胞和溶解性有机物的影响 ..... 代勤, 张文哲, 于潘芬, 易皓, 刘俊新, 肖本益 (2283)

曝气时间对比亚硝化颗粒污泥形成的影响 ..... 李冬, 郭跃洲, 曹美忠, 劳会妹, 李帅, 张杰 (2289)

中国城市污泥中汞含量的时空分布特征 ..... 王宁, 刘清伟, 职音, 程柳, 麻冰涓, 毛宇翔 (2296)

夏季太湖草/藻型湖区N<sub>2</sub>O生成与迁移特征及其影响因素 ..... 郑小兰, 文帅龙, 李鑫, 龚琬晴, 刘德鸿, 钟继承 (2306)

太湖藻型湖区CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>排放特征及其影响因素分析 ..... 贾磊, 蒲旖旎, 杨诗俊, 苏荣明珠, 秦志昊, 张弥 (2316)

内蒙古典型草原季节性冻土区土壤剖面CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O特征 ..... 李晋波, 姚楠, 李秀, 赵英, 张阿凤, 兰志龙, 范庭 (2330)

黄土高原成龄苹果园生态系统CO<sub>2</sub>通量特征 ..... 杨剑锋, 杨小妮, 王俊花, 段宇敏, 祁香宁, 张林森 (2339)

生物炭施用对紫色水稻土温室气体排放的影响 ..... 祁乐, 高明, 郭晓敏, 牛海东, 李婷, 孙涛, 曹群玲, 汤稼豪 (2351)

不同施肥处理对东北黑土温室气体排放的短期影响 ..... 李平, 郎漫, 李森, 魏玮, 李凯凯 (2360)

ITS高通量测序研究黄海微型真核浮游生物多样性及分布特征 ..... 张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 张晓娇 (2368)

不同排海方式城市尾水微生物扩散规律 ..... 郎秀璐, 宋志文, 徐爱玲, 牛成洁, 郭明月 (2380)

旅游活动对岩溶洞穴地下水中细菌群落的影响:以重庆丰都两个洞穴为例 ..... 吕现福, 贺秋芳, 王凤康, 赵瑞一, 张弘 (2389)

不同沼灌年限稻田土壤微生物群落分析 ..... 朱金山, 张慧, 马连杰, 廖敦秀, 杨星勇, 王龙昌, 王定勇 (2400)

生物炭对褐土理化特性及真菌群落结构的影响 ..... 阎海涛, 殷金玉, 丁松爽, 任天宝, 许家来, 宗浩, 高强, 刘国顺 (2412)

铅锌尾矿砂污染下的岩溶土壤微生物群落碳源代谢特征 ..... 房君佳, 李强, 刘畅, 靳振江, 梁月明, 黄炳惠, 卢晓漩, 彭文杰 (2420)

湖库沉积物好氧反硝化菌群脱氮特性及种群结构 ..... 康鹏亮, 张海涵, 黄廷林, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾克宇 (2431)

反硝化菌群的氮代谢与反硝化偶联机制 ..... 张泽宇, 王明霞, 程永毅, 周志峰 (2438)

广西西江流域土壤铅空间分布与污染评价 ..... 张云霞, 宋波, 陈同斌, 伏凤艳, 黄飞, 庞瑞, 潘惠妹 (2446)

三峡库区消落带农业活动对土壤汞变化的影响 ..... 陈秋禹, 孙松, 尹德良, 王永敏, 张成, 王定勇 (2456)

水稻不同生长时期不同组织中抗生内生菌的筛选与鉴定 ..... 王伯勋, 王学东, 段桂兰 (2464)

汞在酸性紫色水稻土的转化与水稻汞富集特征 ..... 李雨琴, 孙涛, 邓晗, 张成, 王永敏, 王定勇 (2472)

华北平原不同生产模式设施蔬菜生命周期环境影响评价 ..... 徐强, 胡克林, 李季, 韩卉, 杨合法 (2480)

基于细菌毒性测试与小鼠肺基因转录分析的PM<sub>2.5</sub>健康效应 ..... 宋鹏程, 陆书玉, 魏永杰, 陈倩倩, 罗丽娟 (2489)

中国PM<sub>2.5</sub>污染空间分布的社会经济影响因素分析 ..... 段杰雄, 翟卫欣, 程承旗, 陈波 (2498)

《环境科学》征订启事(2094) 《环境科学》征稿简则(2164) 信息(2183, 2411, 2445)

# 真空紫外/过二硫酸盐去除饮用水中臭味物质

孙昕<sup>1</sup>, 史路肖<sup>1</sup>, 张焱<sup>1</sup>, 杨婁<sup>1</sup>, 唐晓<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055; 2. 西安扬水环境科技有限公司, 西安 710075)

**摘要:** 为解决饮用水臭味问题, 系统研究了真空紫外光(VUV)活化过二硫酸盐(PS)对典型致嗅物质 2-甲基异茨醇(2-MIB)和土臭素(GSM)的去除效果及影响因素. 结果表明, 在 PS 浓度  $0.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  的条件下, PS 难以去除 2-MIB 和 GSM, VUV/PS 联用工艺比 VUV 对 2-MIB 和 GSM 去除率分别提高 76% 和 74%. VUV/PS 联用工艺对致嗅物质的去除效果主要受 PS 浓度和 VUV 光强影响, 在 PS 浓度  $0.25 \sim 2 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ , VUV 光强  $113.2 \sim 618.5 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$  增加过程中, 2-MIB 的去除率分别增加 42% 和 39%, GSM 去除率分别增加 34% 和 16%. pH 值变化对 2-MIB 和 GSM 去除率的影响并不明显;  $\text{HCO}_3^-$  离子、腐殖酸的存在则导致 2-MIB 和 GSM 去除率的减小, 减少程度随  $\text{HCO}_3^-$  离子、腐殖酸浓度的增大而增大. VUV/PS 联用工艺可有效降解水中致嗅物质, 降低后续水处理的难度.

**关键词:** 真空紫外; 过二硫酸盐; 硫酸根自由基; 2-甲基异茨醇; 土臭素

中图分类号: TU991.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)05-2195-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201709019

## Removal of Odorants in Drinking Water Using VUV/Persulfate

SUN Xin<sup>1</sup>, SHI Lu-xiao<sup>1</sup>, ZHANG Yi<sup>1</sup>, YANG Li<sup>1</sup>, TANG Xiao<sup>2</sup>

(1. 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 odor problem of drinking water, the performance of a VUV/persulfate process and its influencing factors were investigated systematically for removing odors from 2-MIB and GSM. The results showed that it was difficult to remove 2-MIB and GSM using PS alone with a PS concentration of  $0.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ , but the removal rates of 2-MIB and GSM by the VUV/PS process could be increased by 76% and 74%, respectively, compared with VUV alone. The performance of the VUV/PS process was mainly affected by the PS concentration and VUV intensity. When the PS concentration increased from  $0.25$  to  $2 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  and the VUV intensity increased from  $113.2$  to  $618.5 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ , the removal rate of 2-MIB was increased by 42% and 39%, respectively, and the removal rate of GSM was increased by 34% and 16%, respectively. The effect of pH on 2-MIB and GSM removal was not significant. The occurrence of  $\text{HCO}_3^-$  and humic acid will decrease the removal rates of 2-MIB and GSM, and the degree of reduction increases with the concentrations of  $\text{HCO}_3^-$  ion and humic acid. The VUV/PS process can effectively degrade the typical odorants in water and can reduce the difficulty of subsequent water treatment.

**Key words:** ultraviolet light; persulfate; sulfate radicals; 2-MIB; GSM

随着人们生活水平的提高, 对饮用水水质的要求也越来越高. 不良臭味是国内外饮用水处理中常见的问题, 水中致嗅物质不仅降低了饮用水的质量, 引起了用户的抱怨及对水质的怀疑<sup>[1]</sup>, 而且会被水生生物直接吸收积蓄于体内, 影响水产品的品质<sup>[2]</sup>. 虽然目前尚未有致嗅物质导致生物的致死案例, 但有报道指出, 它们若被生物吸收, 确实会对生物个体产生影响<sup>[3]</sup>, 有研究发现, 水体中臭味的最主要来源是藻类和放线菌代谢过程的产物. 目前已报导的能产生致嗅微量有机物的藻类和放线菌达数十种之多<sup>[4]</sup>. 臭味物质又以引起土霉味的土臭素和 2-甲基异茨醇最为常见<sup>[5-7]</sup>. 臭味物质在饮用水中浓度极低, 人的嗅觉对这两种物质极其敏感, 对 GSM 的嗅阈值约为  $1 \sim 10 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$  左右, 对 2-MIB 的嗅阈值约为  $5 \sim 10 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$  左右<sup>[8,9]</sup>. 在我国、日本、

韩国的饮用水水质标准中, 将这两种致嗅物质列入水质参考指标, 并规定其限值均为  $10 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ <sup>[10]</sup>. 这两种物质通常是消毒副产物三氯甲烷等形成的前体物质并且很难通过混凝、沉淀、过滤等常规水处理工艺去除, 鉴于常规工艺对臭味物质处理的局限性, 高级氧化工艺逐渐得到应用.

高级氧化工艺以产生活性自由基并与难降解有机物发生反应, 将大分子难降解有机物转变成易降解的小分子物质, 甚至直接生成  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ , 达到无害化目的. 目前应用较多的去除水中致嗅物质的高级氧化法有紫外/臭氧(UV/ $\text{O}_3$ )、紫外/过氧化氢

收稿日期: 2017-09-03; 修订日期: 2017-11-21

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

(UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)、紫外/氯(UV/Cl<sub>2</sub>)等<sup>[11,12]</sup>,但UV/O<sub>3</sub>联用法仍然存在一些问题,如臭氧发生成本高,利用率偏低并且臭氧与有机物反应有较强的选择性. UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>联用技术中过氧化氢的易分解问题. 而UV/Cl<sub>2</sub>联用的预处理技术会增加后续消毒副产物的前驱物质,进而使得消毒副产物增加. 通过紫外活化过二硫酸盐产生硫酸根自由基,应用硫酸根自由基的氧化能力降解有机物已成为高级氧化领域发展的焦点<sup>[13~16]</sup>. 由于过二硫酸盐在室温下较稳定且硫酸根自由基( $E^0$ 为2.5~3.1 V)带有极强的标准电极电势<sup>[17,18]</sup>,几乎与羟基自由基( $E^0$ 为2.7~2.8 V)有着等同的氧化能力,更胜于臭氧( $E^0$ 为2.07 V)仅略低于氟( $E^0$ 为3.06 V)的标准氧化还原电位,硫酸根自由基氧化能力无选择性,因此硫酸根自由基被认为在理想的条件下可以氧化绝大多数的有机物,使其分解<sup>[19,20]</sup>. 紫外活化过二硫酸盐使过氧酸根中的氧氧键在波长小于270 nm的紫外光照射下产生断裂反应,溶液中可生成两个单位量的硫酸根自由基<sup>[21~24]</sup>.

目前研究大都是基于紫外(UV)的高级氧化技术,本文研究了真空紫外/过二硫酸盐联用的高级氧化技术对2-甲基异莰醇(2-MIB)和土臭素(GSM)的去除效果和影响因素,以期真空紫外/过二硫酸盐实际应用提供参考.

## 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公司);吹扫捕集浓缩仪(Stratum PTC,美国Tekmar公司);超纯水系统(pure-lab Option R7 + Ultra Genetic,英国ELGA).

#### 1.1.2 标准物质与试剂

2-甲基异莰醇(2-methylisoborneol, 2-MIB)和土臭素(geosmin, GSM);标准物质(混标,美国Sigma-Aldrich公司),100 μg·mL<sup>-1</sup>;甲醇(色谱纯,纯度≥99.9%);过二硫酸钠(Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>,纯度≥99.5%);磷酸氢二钠(Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>,纯度≥99.0%);磷酸二氢钠(NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>,纯度≥99.0%). 如无特殊说明,实验所有药品均为天津市科密欧化学试剂有限公司分析纯.

#### 1.1.3 仪器设置条件

吹扫捕集条件:50℃条件下,氮气吹扫11.0 min;250℃脱附2.0 min;280℃烘焙2.0 min;吹扫

流量为20 mL·min<sup>-1</sup>.

色谱条件:进样口温度250℃;分流比5:1. 色谱柱:Agilent HP-5MS:30 m×0.25 mm×0.25 μm;载气(He):1.0 mL·min<sup>-1</sup>恒流;手动进样;柱温:起始温度50℃保持1.0 min,以10℃·min<sup>-1</sup>速率升至200℃,保持1.0 min,再以20℃·min<sup>-1</sup>速率升至220℃,保持1.0 min.

质谱条件:EI离子源温度为230℃,四级杆温度150℃,以保留时间(RT)和质谱全扫描(SCAN)模式进行定性,选择离子监测(SIM)模式进行定量,2-MIB的监测离子为95和107,GSM的监测离子为112和125.

#### 1.1.4 方法检出限和加标回收率

将GSM和2-MIB混标溶液稀释成5 ng·L<sup>-1</sup>,分别进行5次重复测定,测得2-MIB和GSM的方法检出限分别为0.729 ng·L<sup>-1</sup>和1.037 ng·L<sup>-1</sup>,在加标浓度分别为20、100、300 ng·L<sup>-1</sup>的情况下平行实验6次,2-MIB和GSM平均加标回收率分别在92%~108%和88%~104%范围内.

### 1.2 实验装置与方法

本实验采用直径 $R=24$  cm, $H=37$  cm的圆柱形不锈钢反应器,紫外灯竖直放入反应器中,同时外循环泵对溶液进行混合及循环. 系统pH值用2 mmol·L<sup>-1</sup>的磷酸盐缓冲溶液调节(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>和HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup>对自由基氧化系统的影响可忽略),如无特殊说明,系统pH值维持在7.0±0.2左右. 低压汞灯发射主波长254 nm+185 nm(含3%)波长的紫外光. 所有的溶液均用蒸馏水配制,标准溶液先溶于10 mL甲醇中,再溶于总体积为15 L的不锈钢反应器中,初始浓度200 ng·L<sup>-1</sup>的2-MIB和GSM混标溶液,反应前紫外灯预热30 min,每10 min取一个水样进行测样. 实验条件变化汇总如表1所示.

## 2 结果与分析

### 2.1 单独VUV、单独PS和VUV/PS两种工艺联用效能比较

考察了单独VUV、单独过二硫酸盐、VUV/PS高级氧化技术对2-MIB和GSM的去除效果. 其他具体实验条件为:PS浓度0.5 mmol·L<sup>-1</sup>,VUV光强为487.6 μW·cm<sup>-2</sup>,初始浓度为200 ng·L<sup>-1</sup>的2-MIB和GSM混标溶液. 结果如图1所示.

过硫酸根在紫外光照射下可发生如下反应:

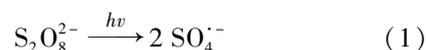


表 1 实验条件汇总

Table 1 Summary of experimental conditions

VUV/ $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$	PS/ $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{HCO}_3^-/\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	pH	腐殖酸/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	水质
487.6	0	0	中性	0	蒸馏水
0	0.5	0	中性	0	蒸馏水
487.6	0.5	0	中性	0	蒸馏水
487.6	改变	0	中性	0	蒸馏水
改变	0.5	0	中性	0	蒸馏水
487.6	0.5	0	改变	0	蒸馏水
487.6	0.5	改变	中性	0	蒸馏水
487.6	0.5	0	中性	改变	蒸馏水

从图 1 可知单独 PS 作用下 60 min 后 2-MIB 和 GSM 的浓度几乎不变化, 表明 2-MIB 和 GSM 难以被 PS 直接氧化. 单独 VUV 光强为  $487.6 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$  的光降解下, 60 min 后 2-MIB 去除率仅为 3.5%, GSM 去除率仅为 17%, 该结果与其他人的研究结论相吻合<sup>[25,26]</sup>. 而 VUV/PS 联用, 60 min 后 2-MIB 去除率可达 79%, GSM 去除率可达 91%. 由于 PS 在 VUV 辐射光照下, 活化产生硫酸根自由基  $\text{SO}_4^{\cdot-}$ , 另外, 少量的 185 nm 处的紫外光照射通入水中的  $\text{O}_2$  可以产生微量的  $\text{O}_3$ , 进一步加强了该体系降解

2-MIB 和 GSM 的效果.

## 2.2 氧化剂投加量的影响

固定混标溶液中 2-MIB、GSM 的浓度为  $200 \text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ , VUV 光强为  $487.6 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ , 降解时间为 60 min, 考察不同 PS 投加量 (0.25、0.5、1、2  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 条件下 2-MIB 和 GSM 的去除效果. 结果如图 2 所示.

结果显示, 随着 PS 投加量从  $0.25 \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  增加到  $2 \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 2-MIB 和 GSM 去除率分别从 53% 和 64% 增加到 95% 和 98%. 说明 PS 在该氧化

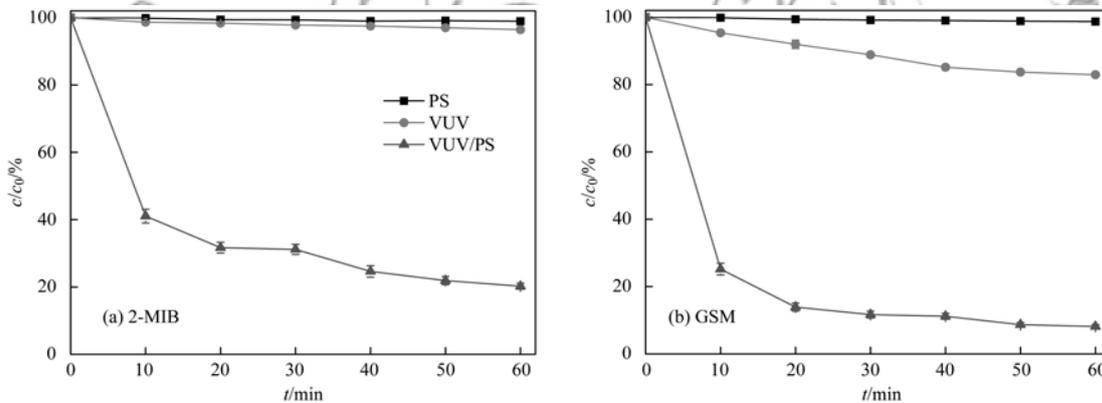


图 1 VUV、PS 和 VUV/PS 对降解 2-MIB 和 GSM 的影响

Fig. 1 Effects of VUV, PS, and VUV/PS on the degradation of 2-MIB and GSM

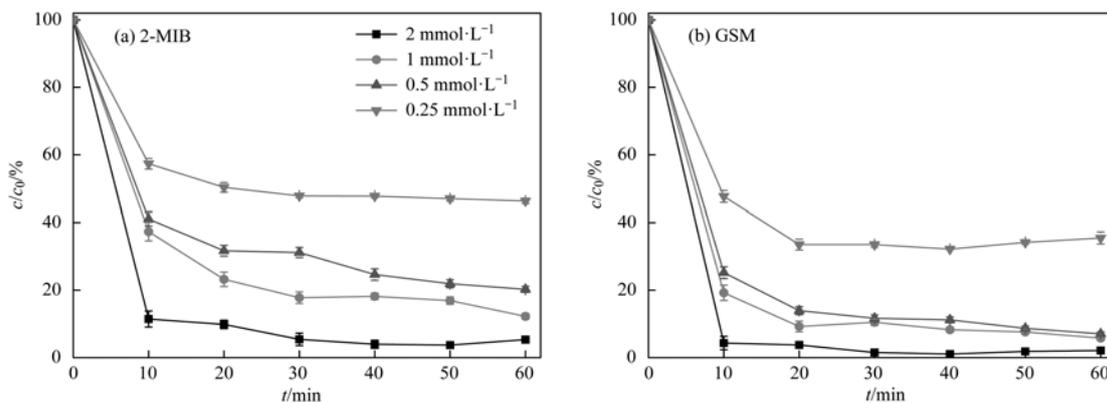


图 2 PS 浓度对 VUV/PS 降解 2-MIB 和 GSM 的影响

Fig. 2 Effect of PS concentration on the degradation of 2-MIB and GSM by VUV/PS

体系中起到了一定的降解作用,这与 Antoniou 等<sup>[25]</sup>在研究去除地下水微污染物方面相一致.由式(1)可知,随着 PS 投加量的增多, VUV 活化产生的硫酸根自由基增多<sup>[26]</sup>,对 2-MIB 和 GSM 的去除率增加.但随着 PS 投加量的增多,PS 与溶液中的  $\text{SO}_4^{\cdot-}$  发生如下反应:



竞争 VUV/PS 体系中的  $\text{SO}_4^{\cdot-}$  使得该体系降解 2-MIB

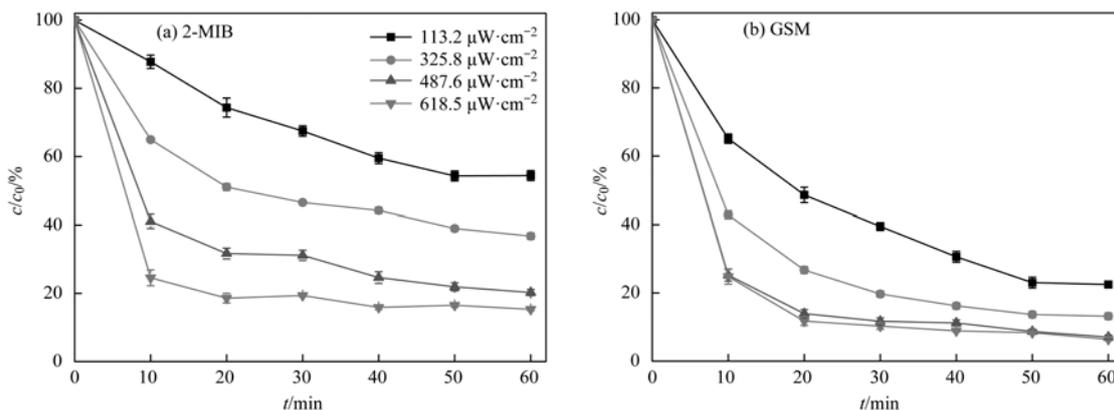


图 3 光强对 VUV/PS 降解 2-MIB 和 GSM 的影响

Fig. 3 Effect of light intensity on 2-MIB and GSM degradation by VUV/PS

从图 3 中可看出,相同时间内,随着光照强度增大,2-MIB 和 GSM 的去除率分别由 45.6% 和 77.5% 增加到 84.7% 和 93.6%.说明光照强度是影响 2-MIB 和 GSM 去除率的重要因素.这是因为紫外光强的增多直接增加了光量子的产生,因此在反应体系中  $\text{SO}_4^{\cdot-}$  也随着光强的加强而增多,体系对 2-MIB 和 GSM 的去除率也增大.

#### 2.4 pH 值对 VUV/PS 联用工艺降解致嗅物质的影响

混标溶液中 2-MIB 和 GSM 初始浓度为  $200 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ,过二硫酸盐浓度为  $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,降解时间为 60 min, VUV 的光强为  $487.6 \text{ } \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ .用硫酸和氢氧化钠调节溶液 pH 分别为 3、5、7、9、11,

和 GSM 减缓.

#### 2.3 光强对 VUV/PS 联用工艺降解致嗅物质的影响

固定混标溶液中 2-MIB 和 GSM 初始浓度为  $200 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ,过二硫酸盐投加量为  $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,降解时间为 60 min,考察在不同紫外光光强 113.2、325.8、487.6 及  $618.5 \text{ } \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$  照射下 2-MIB 和 GSM 的降解效果.图 3 显示了不同紫外光光强条件下 2-MIB 和 GSM 的去除率.

对比考察在不同 pH 值条件下 VUV/PS 联用工艺对 2-MIB 和 GSM 的去除效果.图 4 显示了不同 pH 条件下 2-MIB 和 GSM 的去除效果.

不同 pH 条件下可能发生如下反应<sup>[27]</sup>:



由图 4 可以看出在碱性条件下 2-MIB 和 GSM 的去除率比酸性条件下分别高出 7.8% 和 10%.这与谢鹏超等<sup>[28]</sup>的研究有所差异.原因可能是本实验过程中在线检测并调节 pH 值,使 pH 在反应过程中基本不变.在酸性条件下,部分过硫酸根发生式(2)的反应,导致体系内  $\text{SO}_4^{\cdot-}$  减少.在碱性条件

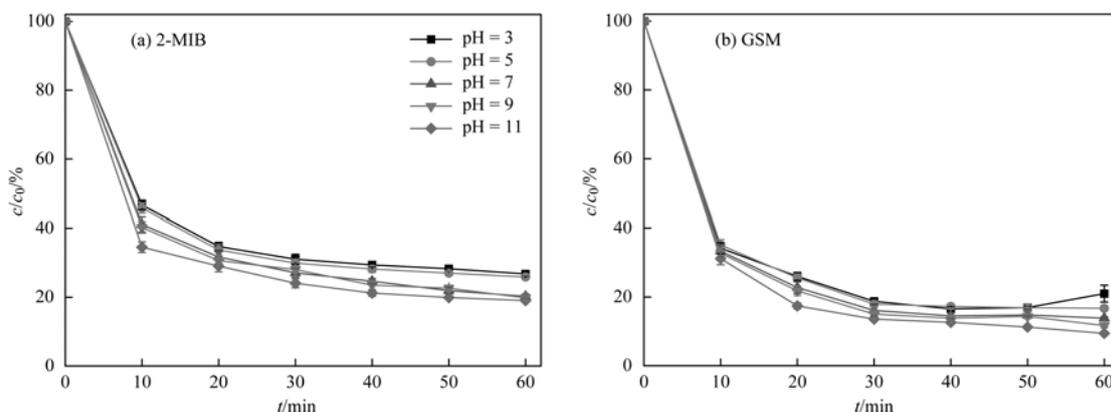


图 4 pH 值对 VUV/PS 降解 2-MIB 和 GSM 的影响

Fig. 4 Effects of different pH values on the degradation of 2-MIB and GSM by VUV/PS

下,发生式(3)的反应,  $\text{SO}_4^{\cdot-}$  与  $\cdot\text{OH}$  稳定存在,且  $\cdot\text{OH}$  可以有效地去除 2-MIB 和 GSM. 但总体来看, pH 的变化对体系影响并不是太大.

### 2.5 碱度对 VUV/PS 联用工艺降解致嗅物质的影响

用蒸馏水配制浓度为  $200 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$  的 2-MIB 和 GSM 混标溶液, 过二硫酸盐浓度为  $0.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,

紫外光强为  $487.6 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ , 反应时间 60 min. 碱度 ( $\text{HCO}_3^-$ ) 是水中主要存在的无机阴离子, 在地表水和地下水中浓度一般较高. 本实验中, 向反应液中投加不同浓度的  $\text{HCO}_3^-$ , 研究  $\text{HCO}_3^-$  对 VUV/PS 降解 2-MIB 和 GSM 效果的影响. 实验结果如图 5 所示.

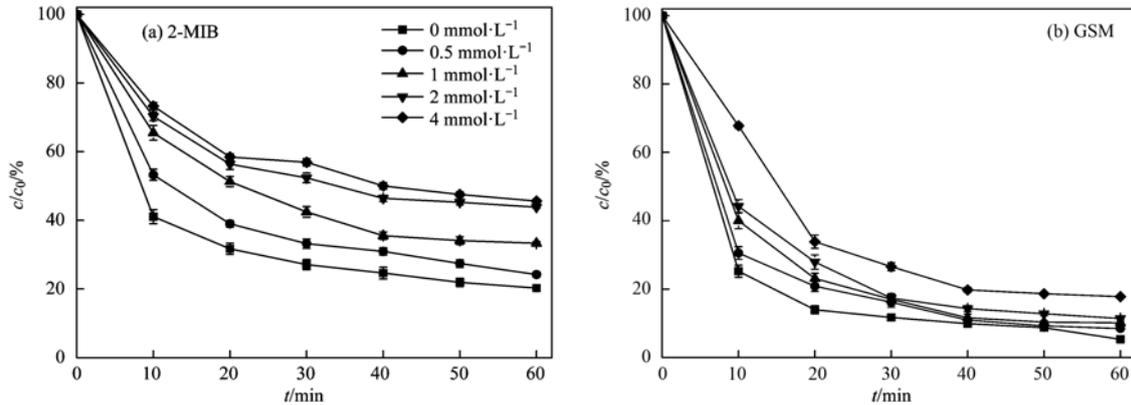


图 5  $\text{HCO}_3^-$  对 VUV/PS 降解 2-MIB 和 GSM 的影响

Fig. 5 Effects of  $\text{HCO}_3^-$  on the degradation of 2-MIB and GSM by VUV/PS

可以看出当  $\text{HCO}_3^-$  浓度从 0 增加到  $4 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 60 min 后 2-MIB 和 GSM 的去除率由 79.8% 和 94.7% 降到 54.4% 和 88.6%. 并且随着  $\text{HCO}_3^-$  浓度的增大, 抑制作用随之增强. 有研究表明,  $\text{HCO}_3^-$  可以与  $\text{SO}_4^{\cdot-}$  发生如下反应<sup>[29]</sup>:



$\text{HCO}_3^-$  对上述反应有较强的抑制作用, 是硫酸根自由基的抑制剂, 可捕获硫酸根自由基, 使 VUV/PS 体系中降解 2-MIB 和 GSM 速率降低. 天然水体中碳酸盐分布十分广泛, 因而研究碱度对 2-MIB 和 GSM 的去除效果的影响很有必要.

### 2.6 腐殖酸对 VUV/PS 联用工艺的影响

实际原水中一般含有一定的腐殖质, 会从一定

程度上削弱 VUV/PS 对 2-MIB 和 GSM 的降解效果. 为研究原水中腐殖酸对 VUV/PS 降解 2-MIB 和 GSM 的影响, 固定 2-MIB 和 GSM 混标溶液初始浓度为  $200 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ , PS 投加浓度为  $0.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 紫外光强为  $487.6 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ . 分别向反应原液中投加 1、3、5 和  $8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的腐殖酸, 反应时间 60 min 后体系中 2-MIB 和 GSM 的去除率如图 6 所示.

从图 6 中可以看出, 当腐殖酸浓度从 0 增加的  $8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 降解 60 min 后 2-MIB 和 GSM 的去除率分别降低了 53.1% 和 77.8%, 影响比较明显并且抑制程度随腐殖酸投加浓度的增加而增大. 初步分析由于投加腐殖酸会使反应体系的色度增加, 同时腐殖酸中有机物捕捉  $\text{SO}_4^{\cdot-}$  的能力比 2-MIB 和

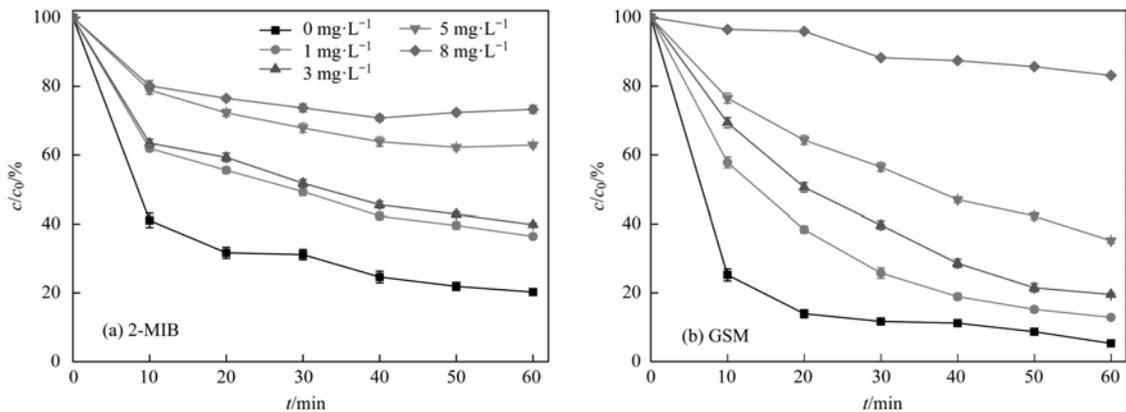


图 6 腐殖酸对 VUV/PS 降解 2-MIB 和 GSM 的影响

Fig. 6 Effects of NOM on the degradation of 2-MIB and GSM by VUV/PS

GSM 强, 从而降低 2-MIB 和 GSM 的去除率. 有研究表明, 腐殖酸其分子结构复杂, 也会对有机物氧化过程产生复杂的影响<sup>[30]</sup>.

### 2.7 不同水质对 VUV/PS 联用工艺降解致嗅物质的影响

为对比考察水中其他污染物对 VUV/PS 工艺去除致嗅物质效果的影响, 实验前对西安某水厂的水源水和出厂水进行检测, 均未检出 2-MIB 和 GSM,

之后用市政管网水配置了  $200 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$  的 2-MIB 和 GSM 的混标溶液. 蒸馏水和市政管网水相关水质指标如表 2 所示.

在相同的反应条件 (光照强度均为  $487.6 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ , 过二硫酸盐浓度  $0.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 初始浓度为  $200 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$  的 GSM 和 2-MIB 混标溶液), 考察水质对 2-MIB 和 GSM 光解反应的影响. 结果如图 7 所示.

表 2 蒸馏水和市政管网水水质指标

Table 2 Water quality index of distilled water and municipal water

水体类型	pH	$\rho(\text{TOC})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	浊度度/NTU	电导率/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	$\sigma(\text{UV}_{254})/\text{cm}^{-1}$
蒸馏水	7.22 ~ 7.88	1.331 ~ 1.663	0	< 20	< 0.005
市政管网水	6.86 ~ 7.52	4.578 ~ 7.086	0.13 ~ 0.42	601 ~ 712	0.082 ~ 0.120

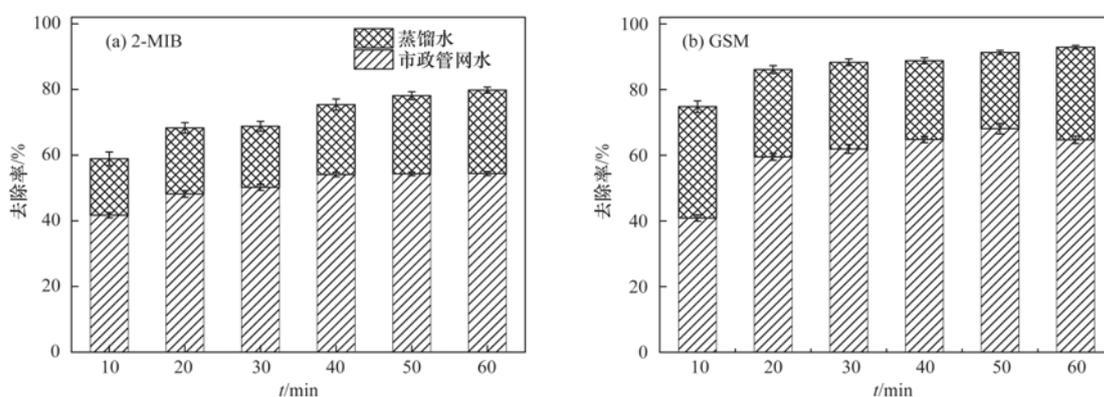


图 7 不同水质对 VUV/PS 降解 2-MIB 和 GSM 的影响

Fig. 7 Effects of different water on the degradation of 2-MIB and GSM by VUV/PS

结果显示, 市政管网水中 2-MIB 和 GSM 的去除率均小于蒸馏水中 2-MIB 和 GSM 的去除率. 在降解 60 min 后, 蒸馏水中 2-MIB 和 GSM 的去除率分别比市政管网水中高 25% 和 27%. 即当水中有机物及多种离子共同存在时, VUV/PS 体系中 2-MIB 和 GSM 去除率会降低. 市政管网水中有机物是主要的干扰因素, 有机质的影响主要表现为: 有机物 (腐殖酸、黄腐酸等) 中大部分存在芳香环、双键等不饱和结构, 对紫外光的吸收强烈. 因此, 对于 2-MIB 和 GSM 分子上的光子流量将减小. 而且有机物的存在使水具有一定的色度, 会降低紫外光的透射率, 从而使 2-MIB 和 GSM 所吸收的有效光子能量降低, 去除率降低.

### 3 结论

(1) 单独真空紫外以及单独过二硫酸盐对致嗅物质的去除效果均不佳, VUV/PS 联用工艺对致嗅物质可达到较理想的去除效果.

(2) 增大紫外光强和过二硫酸盐投加量可提高

VUV/PS 联用工艺对致嗅物质的去除率, 在 PS 浓度  $0.25 \sim 2 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 2-MIB 和 GSM 的去除率分别为 53% ~ 95% 和 64% ~ 98%; 在 VUV 光强  $113.2 \sim 618.5 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$  时, 2-MIB 和 GSM 的去除率分别为 46% ~ 85% 和 78% ~ 94%; 实际操作中可调整合适条件以达最佳去除效果.

(3) VUV/PS 联用工艺在碱性条件下致嗅物质去除率比酸性条件下略高 8% ~ 10%; 溶液中  $\text{HCO}_3^-$ 、腐殖酸、有机物及多种离子的存在会对降解致嗅物质存在不同程度的抑制作用.

#### 参考文献:

- [1] 岳涛, 张德禄, 胡春香. 太湖 3 种优势微囊藻对不同形态磷的吸收利用[J]. 湖泊科学, 2014, 26(3): 379-384.  
Yue T, Zhang D L, Hu C X. Utilization of phosphorus in four forms of the three dominant *Microcystis* morphospecies in Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26(3): 379-384.
- [2] 于建伟, 陈克云, 苏命, 等. 不同营养源条件下螺旋鱼腥藻生长与产嗅特征研究[J]. 环境科学, 2011, 32(8): 2254-2259. Yu J W, Chen K Y, Su M, et al. Influence of nutrient sources on *Anabaena spiroides* growth and odorous compounds production characteristics[J]. Environmental Science, 2011, 32(8): 2254-2259.

- [ 3 ] Burgos L, Lehmann M, Simon D, *et al.* Agents of earthy-musty taste and odor in water; evaluation of cytotoxicity, genotoxicity and toxicogenomics [ J ]. *Science of the Total Environment*, 2014, **490**: 679-685.
- [ 4 ] 马新红. 过氧化氢催化臭氧化水中 2-MIB 的效能及机理初探 [ D ]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.  
Ma X H. Effectiveness and mechanism of  $O_3/H_2O_2$  process for removal of 2-MIB from water [ D ]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [ 5 ] 陈蓓蓓, 高乃云, 马晓雁, 等. 饮用水中嗅味物质——土臭素和二甲基异冰片去除技术 [ J ]. *四川环境*, 2007, **26**(3): 87-93.  
Chen B B, Gao N Y, Ma X Y, *et al.* Removal of stinking compounds geosmin (GSM) and 2-Methylisoborneol (MIB) in drinking water [ J ]. *Sichuan Environment*, 2007, **26**(3): 87-93.
- [ 6 ] 李勇, 陈超, 张晓健, 等. 东江水中典型致嗅物质的调查 [ J ]. *中国环境科学*, 2008, **28**(11): 974-978.  
Li Y, Chen C, Zhang X J, *et al.* Typical odorant component of Dongjiang River in china—a survey [ J ]. *China Environmental Science*, 2008, **28**(11): 974-978.
- [ 7 ] Izaguirre G, Taylor W D. A *Pseudanabaena* species from Castaic Lake, California, that produces 2-methylisoborneol [ J ]. *Water Research*, 1998, **32**(5): 1673-1677.
- [ 8 ] Young W F, Horth H, Crane R, *et al.* Taste and odour threshold concentrations of potential potable water contaminants [ J ]. *Water Research*, 1996, **30**(2): 331-340.
- [ 9 ] Izaguirre G, Taylor W D. Geosmin and MIB events in a new reservoir in southern California [ J ]. *Water Science & Technology*, 2007, **55**(5): 9-14.
- [ 10 ] Koester K. Measuring and modeling geosmin removal from Horsetooth Reservoir water by powdered activated carbon for selected contact times [ D ]. Fort Collins, CO: Colorado State University, 2011.
- [ 11 ] 吴彬彬. 光助过氧化物法处理油田废水 [ D ]. 大连: 大连海事大学, 2016.  
Wu B B. Treatment of oilfield wastewater by sunlight and UV aid peroxide method [ D ]. Dalian: Dalian Maritime University, 2016.
- [ 12 ] Antonopoulou M, Evgeniylou 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 ] 袁蓁, 隋铭皓, 袁博杰, 等. 基于硫酸根自由基的活化过硫酸盐新型高级氧化技术研究新进展 [ J ]. *四川环境*, 2016, **35**(5): 142-146.  
Yuan Z, Sui M H, Yuan B J, *et al.* Research progress of novel sulfate radical-based advanced oxidation process using activated persulfate [ J ]. *Sichuan Environment*, 2016, **35**(5): 142-146.
- [ 14 ] 李社锋, 王文坦, 邵雁, 等. 活化过硫酸盐高级氧化技术的研究进展及工程应用 [ J ]. *环境工程*, 2016, **34**(9): 171-174.  
Li S F, Wang W T, Shao Y, *et al.* Progress in advanced oxidation technology of activated persulfate and its engineering application [ J ]. *Environmental Engineering*, 2016, **34**(9): 171-174.
- [ 15 ] 李丽, 刘占孟, 聂发挥. 过硫酸盐活化高级氧化技术在污水处理中的应用 [ J ]. *华东交通大学学报*, 2014, **31**(6): 114-118.  
Li L, Liu Z M, Nie F H. Research of activating persulfate oxidation technology in Sewage Disposal [ J ]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2014, **31**(6): 114-118.
- [ 16 ] 王兵, 李娟, 莫正平, 等. 基于硫酸自由基的高级氧化技术研究及应用进展 [ J ]. *环境工程*, 2012, **30**(4): 53-57.  
Wang B, Li J, Mo Z P, *et al.* Progress in advanced oxidation processes based on sulfate radical [ J ]. *Environmental Engineering*, 2012, **30**(4): 53-57.
- [ 17 ] He X X, Mezyk S P, Michael I, *et al.* Degradation kinetics and mechanism of  $\beta$ -lactam antibiotics by the activation of  $H_2O_2$  and  $Na_2S_2O_8$  under UV-254 nm irradiation [ J ]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, **279**: 375-383.
- [ 18 ] Sharma J, Mishra I M, Dionysiou D D, *et al.* Oxidative removal of Bisphenol A by UV-C/peroxymonosulfate (PMS): kinetics, influence of co-existing chemicals and degradation pathway [ J ]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, **276**: 193-204.
- [ 19 ] Huang K C, Zhao Z Q, Hoag G E, *et al.* Degradation of volatile organic compounds with thermally activated persulfate oxidation [ J ]. *Chemosphere*, 2005, **61**(4): 551-560.
- [ 20 ] 左传梅. Fe(II)活化过硫酸盐高级氧化技术处理染料废水研究 [ D ]. 重庆: 重庆大学, 2012.  
Zuo C M. Study on degradation of dye wastewater by persulfate oxidation activated by ferrous ion advanced oxidation technology [ D ]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [ 21 ] Malato S, Blanco J, Richter C, *et al.* Enhancement of the rate of solar photocatalytic mineralization of organic pollutants by inorganic oxidizing species [ J ]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 1998, **17**(4): 347-356.
- [ 22 ] 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.
- [ 23 ] 郭忠凯. 硫酸根自由基的定量分析及在高级氧化工艺中的应用 [ D ]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.  
Guo Z K. Quantification of sulfate radical formation and its application in advanced oxidation technology [ D ]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [ 24 ] Kutschera K, Börnich H, Wörch E. Photoinitiated oxidation of geosmin and 2-methylisoborneol by irradiation with 254 nm and 185 nm UV light [ J ]. *Water Research*, 2009, **43**(8): 2224-2232.
- [ 25 ] Antoniou M G, Andersen H R. Comparison of UVC/ $S_2O_8^{2-}$  with UVC/ $H_2O_2$  in terms of efficiency and cost for the removal of micropollutants from groundwater [ J ]. *Chemosphere*, 2015, **119**(S1): S81-S88.
- [ 26 ] Wang C W, Liang C J. Oxidative degradation of TMAH solution with UV persulfate activation [ J ]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, **254**: 472-478.
- [ 27 ] Gao Y Q, Gao N Y, Deng Y, *et al.* Ultraviolet (UV) light-activated persulfate oxidation of sulfamethazine in water [ J ]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, **195-196**: 248-253.
- [ 28 ] 谢鹏超. 紫外/过硫酸盐氧化除嗅并控制消毒副产物生成的效能研究 [ D ]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.  
Xie P C. Removal of odor-compounds and control of disinfection byproduct formation by UV/persulfate oxidation [ D ]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [ 29 ] Ghauch A, Tuqan A M. Oxidation of bisoprolol in heated persulfate/ $H_2O$  systems: kinetics and products [ J ]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, **183**: 162-171.
- [ 30 ] Bang H, Slokar Y M, Ferrero G, *et al.* Removal of taste and odor causing compounds by UV/ $H_2O_2$  treatment; effect of the organic and inorganic water matrix [ J ]. *Desalination and Water Treatment*, 2016, **57**(57): 27485-27494.

## CONTENTS

Estimation of Fine Particle (PM <sub>2.5</sub> ) Emission Inventory from Cooking: Case Study for Shanghai	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1971)
Chemical Characterization, Spatial Distribution, and Source Identification of Organic Matter in PM <sub>2.5</sub> in summertime Shanghai, China	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, JING Sheng-ao, <i>et al.</i> (1978)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Salts in PM <sub>2.5</sub> in the Southern Suburbs of Beijing	GAO Han-yu, WEI Jing, WANG Yue-si (1987)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM <sub>2.5</sub> During Spring in Tianjin Using the Quadrat Sampling Method	ZHAO Jing-qi, JI Ya-qin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (1994)
HONO Pollution Characteristics and Nighttime Sources During Autumn in Guangzhou, China	TIAN Zhi-lin, YANG Wen-da, YU Xiao-fang, <i>et al.</i> (2000)
Sulfur Sources and Oxidation Pathways in Summer Aerosols from Nanjing Northern Suburbs Using S and O Isotopes	HAN Xun, REN Jie, CHEN Shan-li, <i>et al.</i> (2010)
Methods for Determining and Applications of High-Resolution Vehicle Emission Inventory at County Scale	FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (2015)
Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emitted from Typical Industrial Biomass Boilers	LIN Yu-jun, BAI Li, WANG Huan-xiang, <i>et al.</i> (2023)
Research of Parameter Uncertainty for the HSPF Model Under Different Temporal Scales	PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, MA Wen-jing (2030)
Contribution of Nitrogen Sources in Water Sources by Combining Nitrogen and Oxygen Isotopes and SIAR	JIN Zan-fang, ZHANG Wen-liao, ZHENG Qi, <i>et al.</i> (2039)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, ZHAO Yong-hui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2048)
Fluorescent Characteristics and Environmental Significance of Particulate Organic Matter in Lake Taihu, China	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (2056)
Distribution and Settlement of Microplastics in the Surface Sediment of Yangtze Estuary	ZHU Xiao-tong, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (2067)
Water Chemistry and Characteristics of Dissolved Organic Carbon During the Wet Season in Wulixia Reservoir, SW China	LU Xiao-xuan, LI Qiang, JIN Zhen-jiang, <i>et al.</i> (2075)
Bioavailability of Dissolved Organic Carbon in Rivers for Typical Vegetation Types in the Permafrost Regions on the Qinghai-Tibet Plateau	MA Xiao-liang, LIU Gui-min, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (2086)
Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) and Relationship with Dissolved Heavy Metals in a Peri-urban and an Urban River	LIANG Meng-qi, SHAO Mei-ling, CAO Chang-li, <i>et al.</i> (2095)
Migration and Transformation of Dissolved Organic Matter in Karst Water Systems and an Analysis of Their Influencing Factors	ZHANG Lian-kai, LIU Peng-yu, QIN Xiao-qun, <i>et al.</i> (2104)
Source and Distribution of Dissolved Metal Ions in the Backwater Area of Pengxi River in Three Gorges Reservoir	ZHAO Xiao-song, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2117)
Differences in Diffusive Fluxes of Nutrients from Sediment Between the Natural River Areas and Reservoirs in the Lancang River Basin	WANG Xue, CHENG Bao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (2126)
Nutrient Distribution Characteristics of the Sediment-water System in the Xiangxi River During the Impoundment of TGR	SU Qing-qing, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2135)
Effects of Submerged Macrophytes on Different Phosphorus Fractions in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, GAO Shun-feng, WAN Rui, <i>et al.</i> (2145)
Distribution Characteristics and Fluxes of Nitrogen and Phosphorus at the Sediment-water Interface of Yuqiao Reservoir	WEN Shuai-long, GONG Wan-qing, WU Tao, <i>et al.</i> (2154)
Distribution of Phosphorus Fractions in Surface Sediments of Minjiang Mainstreams	YANG Geng, QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, <i>et al.</i> (2165)
Nitrate Uptake Kinetics and Correlation Analysis in an Agricultural Drainage Ditch	LI Ru-zhong, YIN Qi-he, GAO Su-di, <i>et al.</i> (2174)
Influencing Factors for Phosphorus Removal by Modified Bio-ceramic Substrates Coated with ZnAl-LDHs Synthesized by Different Modification Conditions	XIANG Yang, ZHANG Xiang-ling, LEI Yu, <i>et al.</i> (2184)
Removal of Odorants in Drinking Water Using VUV/Persulfate	SUN Xin, SHI Lu-xiao, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (2195)
Degradation of OG with Peroxymonosulfate Activated by a MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> -graphene Hybrid	XIA Wen-jun, LIU Feng, HAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism of As(V) Removal from Water by Lanthanum and Cerium Modified Biochars	LI Jin, ZU Yan-qun, LI Gang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption of Dissolved Organic Matter with Different Relative Molecular Masses on Inorganic Minerals and Its Influence on Carbamazepine Adsorption Behavior	LIANG Yu, HE Jiang-tao, ZHANG Si (2219)
Pollution Characteristics of Organophosphorus Flame Retardants in a Wastewater Treatment Plant	SUN Jia-wei, DING Wei-nan, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (2230)
Enhanced Coagulation as a Pretreatment for Low Temperature Wastewater	LIU Hai-long, REN Yu-xia, ZHANG Zhong-min (2239)
Operating Characteristics and Fouling Characteristics of a RO Membrane System for Desalination of Dyeing Wastewater	TAN Yu-jun, ZHANG Ze-tian, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (2249)
Optimization of the Nitrogen Removal Performance on the CANON Process in a Biofilm Reactor: From FBBR to MBBR	FU Kun-ming, LI Hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i> (2256)
Microbial Community Dynamics During Two Sludge Granulation Processes	GAO Jing-feng, ZHANG Li-fang, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2265)
Sludge Conditioning Performance of Polyaluminum, Polyferric, and Titanium Xerogel Coagulants	WANG Xiao-meng, WANG Xin, YANG Ming-hui, <i>et al.</i> (2274)
Effects of Heat and Heat-alkaline Treatments on Disintegration and Dissolved Organic Matter in Sludge	DAI Qin, ZHANG Wen-zhe, YU Pan-fen, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Formation of Partial Nitrification Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (2289)
Spatial and Temporal Variation of Mercury in Municipal Sewage Sludge in China	WANG Ning, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (2296)
Characteristics of N <sub>2</sub> O Release and Influencing Factors in Grass-type and Algae-type Zones of Taihu Lake During Summer	ZHENG Xiao-lan, WEN Shuai-long, LI Xin, <i>et al.</i> (2306)
Analysis of Greenhouse Gas Emission Characteristics and Their Influencing Factors in the Algae Zone of Lake Taihu	JIA Lei, PU Yi-ni, YANG Shi-jun, <i>et al.</i> (2316)
Dynamics of CO <sub>2</sub> and N <sub>2</sub> O in Seasonal Frozen Soil Profiles for a Typical Steppe in Inner Mongolia	LI Jin-bo, YAO Nan, LI Xiu, <i>et al.</i> (2330)
Characteristics of CO <sub>2</sub> Flux in a Mature Apple ( <i>Malus domestica</i> ) Orchard Ecosystem on the Loess Plateau	YANG Jian-feng, YANG Xiao-ni, WANG Jun-hua, <i>et al.</i> (2339)
Effects of Biochar Application Rates on Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, GUO Xiao-min, <i>et al.</i> (2351)
Short-Term Effects of Different Fertilization Treatments on Greenhouse Gas Emissions from Northeast Black Soil	LI Ping, LANG Man, LI Miao, <i>et al.</i> (2360)
Eukaryotic Micro-plankton Community Diversity and Characteristics of Regional Distribution in the Yellow Sea by ITS High-throughput Sequencing	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2368)
Influence of Different Patterns of Discharge on Microbial Diffusion in Municipal Treated Wastewater	LANG Xiu-lu, SONG Zhi-wen, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (2380)
Impact of Tourism on Bacterial Communities of Karst Underground River: A Case Study from Two Caves in Fengdu, Chongqing	LÜ Xian-fu, HE Qiu-fang, WANG Feng-kang, <i>et al.</i> (2389)
Diversity of the Microbial Community in Rice Paddy Soil with Biogas Slurry Irrigation Analyzed by Illumina Sequencing Technology	ZHU Jin-shan, ZHANG Hui, MA Lian-jie, <i>et al.</i> (2400)
Effect of Biochar Amendment on Physicochemical Properties and Fungal Community Structures of Cinnamon Soil	YAN Hai-tao, YIN Quan-yu, DING Song-shuang, <i>et al.</i> (2412)
Carbon Metabolism Characteristics of the Karst Soil Microbial Community for Pb-Zn Mine Tailings	FANG Jun-jia, LI Qiang, LIU Chang, <i>et al.</i> (2420)
Denitrification Characteristics and Community Structure of Aerobic Denitrifiers from Lake and Reservoir Sediments	KANG Peng-liang, ZHANG Hai-han, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2431)
Investigation of the Coupling Mechanism Between Naphthalene Degradation and Denitrification of a Naphthalene Degraded Bacterial Consortium Under Denitrification	ZHANG Ze-yu, WANG Ming-xia, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2438)
Spatial Distribution Study and Pollution Assessment of Pb in Soils in the Xijiang River Drainage of Guangxi	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2446)
Effects of Agricultural Activities on Soil Mercury Changes in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	CHEN Qiu-yu, SUN Song, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2456)
Screening and Identification of Arsenic-resistant Endophytic Bacteria from Different Rice Tissues ( <i>Oryza sativa</i> L.) in Different Growth Stages	WANG Bo-xun, WANG Xue-dong, DUAN Gui-lan (2464)
Characteristics of Mercury Transformation in Soil and Accumulation in Rice Plants in an Acidic Purple Paddy Soil Area	LI Yu-qin, SUN Tao, DENG Han, <i>et al.</i> (2472)
Life Cycle Environmental Impact Assessment on Different Modes of Greenhouse Vegetable Production in the North China Plain	XU Qiang, HU Ke-lin, LI Ji, <i>et al.</i> (2480)
Health Effects of PM <sub>2.5</sub> Based on Bacterial Toxicity Test and Transcriptional Analysis in Lungs of Mice	SONG Peng-cheng, LU Shu-yu, WEI Yong-jie, <i>et al.</i> (2489)
Socio-economic Factors Influencing the Spatial Distribution of PM <sub>2.5</sub> Concentrations in China: An Exploratory Analysis	DUAN Jie-xiong, ZHAI Wei-xin, CHENG Cheng-qi, <i>et al.</i> (2498)