

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.5
第40卷 第5期

目次

2016年10~11月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律	张晗宇,程水源,姚森,王晓琦,张俊峰(1999)
餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征	王红丽,景盛翱,乔利平(2010)
泰山顶(1534 m)夏季气溶胶粒径分布特征	沈利娟,王红磊,银燕,陈魁,陈景华,施双双(2019)
郑州-新乡冬季PM _{2.5} 中元素浓度特征及其源分析	闫广轩,张朴真,黄海燕,高雅,张靖雯,宋鑫,张佳羽,李怀刚,曹治国,姜继韶,樊静,王跃思,金彩霞(2027)
我国PM _{2.5} 浓度分阶段改善目标情景分析	贺晋瑜,燕丽,王彦超,雷宇,汪旭颖(2036)
安阳市典型工业源PM _{2.5} 排放特征及减排潜力估算	杜小申,燕丽,贺晋瑜,汪旭颖,王克,张瑞芹(2043)
郑州市典型工业炉窑细颗粒物排放特征及清单	赵庆炎,韩士杰,张轶舜,杨留明,张瑞芹,燕启社(2052)
2015年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性	乔月珍,陈凤,赵秋月,刘倩(2062)
兰州市化石燃料燃烧源排放VOCs的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势	刘镇,朱玉凡,郭文凯,刘晓,陈强(2069)
12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征	李双江,袁相洋,李琦,冯兆忠(2078)
我国典型陆地生态系统水化学离子特征及空间分布	黄丽,张心昱,袁国富,朱治林,唐新斋,孙晓敏(2086)
我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价	刘昔,王智,王学雷,李珍,杨超,厉恩华,位慧敏(2094)
我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价	范博,王晓南,黄云,李霖,高祥云,李雯雯,刘征涛(2101)
大连海域入海污染源中PFASs的赋存、输入通量和季节特征	陈虹,韩建波,张灿,程嘉熠(2115)
干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义	袁瑞丰,李宗省,蔡玉琴,邹海明(2122)
柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素	黄奇波,覃小群,刘朋雨,程瑞瑞,李腾芳(2132)
崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素	周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,覃小群,黄奇波,张连凯(2143)
三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析	秦延文,韩超南,郑丙辉,马迎群,杨晨晨,刘志超,张雷,赵艳民(2152)
三峡水库蓄水至175 m后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力	黎睿,潘婵娟,汤显强,肖尚斌,李青云,杨文俊(2160)
不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素	李莹杰,王丽婧,李虹,欧阳美凤(2170)
巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源磷的响应及释放风险	李如忠,鲍琴,戴源(2178)
闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析	徐健,袁旭音,叶宏萌,张晓辉,周慧华,韩年(2186)
生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应	蒋倩文,刘锋,彭英湘,王华,姚燃,李红芳,罗沛,刘新亮,吴金水(2194)
太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估	张杰,郭西亚,曾野,邓建才(2202)
三峡水库支流汝溪河口水体汞的时空变化特征	马尉斌,陈秋禹,尹德良,孙涛,王永敏,王定勇(2211)
多功能型城市人工湿地水体汞分布特征及其量变分析	刘伟豪,王永敏,樊宇飞,吕东威,王定勇(2219)
不同类型城市人工湿地水体汞的分布特征	樊宇飞,刘伟豪,孙涛,苑萌,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2226)
微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响	黄福义,杨凯,张子兴,苏建强,朱永官,张娟(2234)
上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析	吴杰,熊丽君,吴健,沙晨燕,唐浩,林匡飞,李大雁,沈城(2240)
异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系	王振方,张玮,杨丽,徐玉萍,赵凤斌,王丽卿(2249)
水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析	刘雪晴,黄廷林,李楠,杨尚业,李扬,徐进,王涵玥(2258)
绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应	毕业亮,吴诗敏,周思宁,吴尚华,宿辉,白志辉,徐圣君(2265)
紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能	伏芝萱,郭迎庆,楚文海(2271)
UV降解水溶液中拉法辛的影响因素及机制	吕娟,许志伟,王言(2278)
铝代水铁矿协同吸附砷的机制	黄博,郭朝晖,肖细元,彭驰,朱惠文,史磊,阳安迪(2287)
新型材料磁性氧化铁的除氟效能	方文侃,李小娣,方菁,吴德意(2295)
羧基改性阴极对微生物电合成系统产乙酸性能的影响机制	祁家欣,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(2302)
基于分区供氧与溶解氧调控的低C/N比污水短程硝化反硝化	吴春雷,荣懿,刘晓鹏,史会欣,章武首,金鹏康,马文伟(2310)
不同COD浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征	马艳红,赵智超,安芳娇,黄利,师晓娟,慕浩,陈永志(2317)
15℃SBBR短程硝化快速启动和稳定运行性能	孙艺齐,卞伟,李军,赵青,王文啸,梁东博,吴耀东(2326)
长期低聚磷条件对AO-SBR系统Accumulibacter代谢特性的影响	王少坡,李柱,赵乐丹,于静洁,赵明,郑胜达,孙力平(2333)
厌氧氨氧化颗粒污泥EPS及其对污泥表面特性的影响	杨明明,刘子涵,周杨,祁菁,赵凡,郭劲松,方芳(2341)
HN-AD菌生物强化接触氧化工艺处理猪场沼液	刘向阳,张千,吴恒,李宸,唐健泓,封丽,肖芃颖,赵天涛(2349)
温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响	黄方玉,邓良伟,杨红男,杨含,肖友乾,王兰(2357)
城市污水处理系统真核微生物群落特性与地域性差异	秦文韬,张冰,孙晨翔,陈湛,文湘华(2368)
三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响	王娜,高婕,魏静,刘颖,庄绪亮,庄国强(2375)
亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制	刘晋仙,李鑫,罗正明,王雪,暴家兵,柴宝峰(2382)
生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响	刘杰云,邱虎森,王聪,沈健林,吴金水(2394)
地膜覆盖和施肥对菜地CH ₄ 排放的影响	倪雪,江长胜,陈世杰,李晓茜,石孝均,郝庆菊(2404)
亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响	王晓云,蔡焕杰,李亮,徐家屯,陈慧(2413)
不同施肥模式对热区晚稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	田伟,伍延正,汤水荣,胡玉麟,赖倩倩,文冬妮,孟磊,吴川德(2426)
周期性变温对紫色土有机碳矿化的影响	曾蔓蔓,慈恩,樊晶晶,李江文,翁吴璐,李松(2435)
广西高镉异常区水田土壤Cd含量特征及生态风险评价	宋波,王佛鹏,周浪,吴勇,庞瑞,陈同斌(2443)
超富集植物藿香蓿(Ageratum conyzoides L.)对镉污染农田的修复潜力	张云霞,宋波,宾娟,周子阳,陈记玲,陈同斌(2453)
种植油菜麦评价多环芳烃污染土壤的农用风险	焦海华,郭佳佳,张婧旻,张晓霞,茹文明,白志辉(2460)
土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应	舒心,李艳,李锋,冯靖仪,沈嘉瑜,史舟(2471)
某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价	吕占禄,张金良,陆少游,邹天森,刘凯,张晗,谷亚亚(2483)
《环境科学》征订启事(2018)	《环境科学》征稿简则(2042)
信息(2114, 2348, 2393)	

紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能

伏芝萱¹, 郭迎庆¹, 楚文海^{2*}

(1. 常州大学环境与安全工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 卤乙酰胺 (HAcAms) 是一类具有高细胞毒性和高遗传毒性的饮用水含氮消毒副产物 (N-DBPs), 并在饮用水中被广泛检出, 其中三氯乙酰胺 (TCAcAm) 的毒性显著高于传统 DBPs. 本实验以配置的 TCAcAm 溶液作为目标污染物, 采用紫外 (UV) 活化亚硫酸钠 (Na_2SO_3) 体系降解水中的 TCAcAm, 并探究在该体系下光强、还原剂投加剂量 (Na_2SO_3) 和 pH 对还原降解 TCAcAm 效果的影响. 结果表明, 采用 UV/ Na_2SO_3 体系可快速降解 TCAcAm, 其降解效果与光强、 Na_2SO_3 投加剂量和 pH 均呈正相关, 且 pH 值对反应速率与降解率有显著影响, 当 pH 值从 6 提高至 9, TCAcAm 的降解率在反应 120 min 时从 12.8% 提高至 99.6%. 在光强为 $450 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$, pH 为 9, Na_2SO_3 投加剂量为 $1.00 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, 连续 30 min 光照条件下, TCAcAm 降解率达到 99.4%. 实验证明 UV/ Na_2SO_3 体系是一种有效消减 TCAcAm 的高级还原技术, 并且具备还原降解其他卤代 DBPs 的潜力, 可用于饮用水中卤代 DBPs 的降解.

关键词: 三氯乙酰胺; 高级还原; 亚硫酸钠; 光强; 剂量; pH

中图分类号: TU991.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)05-2271-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201810100

Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite

FU Zhi-xuan¹, GUO Ying-qing¹, CHU Wen-hai^{2*}

(1. School of Environment and Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Haloacetamides (HAcAms) are an emerging class of nitrogenous disinfection by-products (N-DBPs) with high cytotoxicity and genotoxicity, which are widely detected in drinking water. The toxicity of trichloroacetamide (TCAcAm) is significantly higher than traditional DBPs. In this study, ultraviolet (UV) treatment was combined with sodium sulphite (Na_2SO_3) to remove TCAcAm from water. The effects of different light intensities, different agent dosages (Na_2SO_3), and pH conditions on the removal of TCAcAm by UV/ Na_2SO_3 advanced reduction process were investigated. The results showed that TCAcAm could be rapidly degraded by the UV/ Na_2SO_3 system. The degradation effect was directly proportional to light intensity, dosage of Na_2SO_3 , and pH. Moreover, the pH had a significant effect on the reaction rate and degradation rate. As the pH increased from 6 to 9, the degradation rate of TCAcAm increased from 12.8% to 99.6%, in 120 min. The removal rate of TCAcAm reached 99.4% when the UV light intensity, pH, Na_2SO_3 dosage, and reaction time were $450 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$, 9, $1.00 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, and 30 min, respectively. The experimental results indicated that the UV/ Na_2SO_3 system is an efficient advanced reduction process for the removal of TCAcAm, and it has the potential to reduce other halogenated DBPs. Therefore, it could be used for the degradation of halogenated DBPs in the treatment of drinking water.

Key words: trichloroacetamide; advanced reduction; sodium sulfite; light intensity; dosage; pH

氯消毒技术的应用是目前保证城镇供水安全最常见的水处理措施. 该技术极大降低了以水为媒介的疾病发病率, 但也由此引发了一系列负面后果, 如消毒副产物 (disinfection by-products, DBPs) 的产生^[1-3]. 近年来, 随着科学研究的不断深入以及生活水平的快速提高, 饮用水中消毒副产物的问题得到越来越多的重视^[4,5]. 卤乙酰胺 (haloacetamides, HAcAms) 是继卤乙腈 (HANs)、卤代硝基甲烷 (HNMs) 和 *N*-亚硝基二甲胺 (NDAM) 之后发现的高毒性含氮消毒副产物 (N-DBPs), 主要由水中的溶解性有机氮 (DON) 与消毒时所投加的消毒剂反应生成^[6-8]. 毒理学研究表明, 相对于卤乙酸 (HAAs)、三卤甲烷 (THMs)、卤代呋喃酮 (MX) 等含碳消毒副产物 (C-DBPs) 及 HANs、HNMs 等 *N*-DBPs, HAcAms 具有更高的细胞毒性和遗传毒性,

且在饮用水中已被广泛检出^[9-13]. 三氯乙酰胺 (TCAcAm) 是 HAcAms 中较为常见的一种, Zhang 等^[14] 通过代谢组学方法考察并发现 TCAcAm 的毒性显著高于三氯甲烷等传统 DBPs, 因此亟需寻找一种高效的水处理技术降解饮用水中的 TCAcAm.

近年来, 采用高级还原技术 (advanced reduction processes, ARPs) 降解污染物已成为水处理领域的研究热点之一^[15]. ARPs 是指利用一定手段 (例如 UV 辐照) 活化还原剂, 从而产生强还原性自由基并高效还原目标污染物的过程^[16,17]. ARPs 在降解水

收稿日期: 2018-10-16; 修订日期: 2018-12-07

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07201005)

作者简介: 伏芝萱 (1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为消毒副产物的降解, E-mail: fuzhixuan3@163.com

* 通信作者, E-mail: feedwater@126.com

中 1,2-二氯乙烷、砷、2,4,6-三氯苯酚、高氯酸盐、硝酸盐以及全氟辛烷磺酸等方面均效果显著^[18~22]。Liu 等^[18]通过 UV 与 Na_2SO_3 等还原试剂结合处理 (1,2-DCA), 在 pH 为 11 的条件下对 1,2-DCA 的脱氯率达到 90% 以上; Vellanki 等^[21]通过 UV/ Na_2SO_3 处理高氯酸盐和硝酸盐, 亦发现 UV-L/亚硫酸盐可降解高氯酸盐和硝酸盐等无机物质, 并且效果随着 pH 的提高而改善。然而, UV/ Na_2SO_3 体系对饮用水中高毒性有机消毒副产物 TCACAm 的处理特性如何尚不明确。

基于此, 本文采用 UV/ Na_2SO_3 高级还原体系降解高毒性含氮消毒副产物 TCACAm, 在探究不同条件下 TCACAm 降解效能的同时, 明确其反应机制, 以期为开拓饮用水中卤代 N-DBPs 的还原控制技术方法提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 实验材料

TCACAm (纯度 > 98%), 缓冲盐 Na_2HPO_4 、 KH_2PO_4 、 Na_2CO_3 和 NaHCO_3 (分析纯), 萃取剂甲基叔丁基醚 (MTBE, 色谱纯) 均购自于阿拉丁工业公司 (中国, 上海); Na_2SO_3 为麦克林公司产品 (中国, 上海); 超纯水由 Millipore Milli-Q Gradient 水净化系统 (Billerica, MA) 制备, 电阻率为 18.2 $\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$; 紫外辐照计购自北京师范大学光电仪器厂 (中国, 北京)。 Na_2SO_3 溶液与目标污染物溶液均现配现用。

1.2 实验方法

实验前 UV 预热至少 30 min, 保证紫外光的稳定输出 (UV 主波长为 254 nm, 额定工作电压 220 V), 测量烧杯底部的光强。反应在 500 mL 烧杯中进行, 倒入 500 mL 配置好的缓冲液, 将缓冲溶液放在水浴锅内加热至 25℃, 待 15 min 后取出。用电子天平称取一定量 TCACAm 固体, 溶于超纯水中制成目标污染物母液, 将配置好的 TCACAm 母液加入缓冲溶液中, 温和搅拌 1 min 后取样测量 TCACAm 初始浓度, 并加入还原剂 Na_2SO_3 , 在不同时间点取样, 检测其浓度。为研究高级还原技术对 TCACAm 降解效果的影响, 进行不同光强 (150、250、350 和 450 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$)、不同 Na_2SO_3 投加剂量 (0.50、0.75、1.00 和 2.00 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) 以及不同 pH (pH 6、pH 7、pH 8 和 pH 9) 降解 TCACAm 的实验。所有实验均重复 2 次, 结果取平均值。

缓冲盐: pH 为 6、7、8 的反应溶液由 Na_2HPO_4 和 KH_2PO_4 配制, pH 为 9 的反应溶液由 Na_2CO_3 和 NaHCO_3 配制。

本实验溶液为模拟实际情况, 不采用氮气曝气去除溶解氧。

1.3 分析方法

在目标的各时间点对水样中 TCACAm 进行定量分析。取 10 mL 反应样品, 并使用 2 mL 的 MTBE 进行萃取, 然后使用多管涡旋混合器 (DMT-2500, 中国上海) 振荡 5 min, 转速为 2 300 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$, 静置 5 min 后取样, 通过气相色谱质谱进行分析测定。气相色谱质谱仪器设置条件如下: 检测仪器为 GC-MS (QP2020, 岛津), 色谱柱为 RTX-5MS 毛细管柱 (柱长 30 m, 内径 0.25 mm, 膜厚 2.5 μm)。检测条件载气为高纯氦气, 载气流量控制方式为压力控制, 载气流速 58 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 进样量 1 μL , 进样方式为无分流, 进样口温度为 180℃, 质谱检测器温度为 250℃, 离子源为电子轰击离子源 (EI) 电子能量为 70 eV, 扫描质量范围 m/z 为 30 ~ 300 u, 检测模式为选择离子检测 (SIM)。升温程序初始温度为 40℃, 保持 10 min, 再以 20 $^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率升温至 200℃, 保持 2 min^[23]。通过离子色谱仪 (Dionex ICS-1000, 美国) 定量氯离子。实验数据使用 Origin 9.0 软件进行拟合。

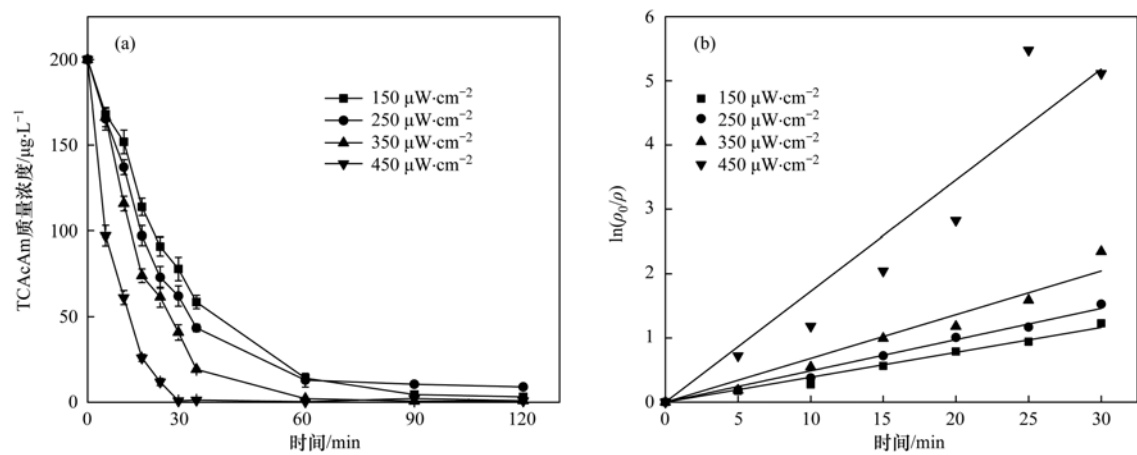
2 结果与讨论

2.1 UV/ Na_2SO_3 体系降解 TCACAm

2.1.1 光强的影响

在 pH 为 9, 还原剂 Na_2SO_3 投加剂量为 1.00 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的条件下, 通过调节 UV_{254} 的光强, 考察 120 min 反应周期内初始质量浓度为 200 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 TCACAm 降解效果, 如图 1(a) 所示。实验数据显示, 反应进行 5 min 时, 在光强为 150 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 条件下, TCACAm 的降解率仅有 16.0%, 而在光强为 450 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 条件下, TCACAm 的降解率达到 51.4%。这表明本实验反应速率与光照强度正相关, 即光照强度越大, 反应速率越快。随着反应时间延长, 不同光强对 TCACAm 的降解趋于平衡, 且于 90 min 时被降解完全。在反应 30 min 内符合拟一级反应动力学特征, 按照一级反应动力学公式 $\ln(\rho_0/\rho) = K\cdot t_i$ 将实验数据进行拟合 [图 1(b) 和表 1]。

本实验结果表明, 虽然不同光强均能在 90 min 内降解 TCACAm, 但在 30 min 内不同光强对其降解的速率仍有差距。从表 1 可以看出, 在实验范围内反应速率常数 K 随着光强的增加而增大, 反应速率加快。这是因为在一定的光强范围内, 随着光强的增加, UV 活化还原剂产生的强还原性自由基增多, 从而 TCACAm 的降解速率加快^[20,24~27]。本实验发



(a)不同光强降解 TCACAm 效果; (b)不同光强降解 TCACAm 的 $\ln(\rho_0/\rho)$ 与时间的关系

图1 光强对 TCACAm 降解效果的影响

Fig. 1 Effect of UV irradiation intensity on the degradation of TCACAm

表1 不同光强下 TCACAm 的一级反应动力学参数

Table 1 Kinetic parameters of TCACAm photodegradation at different UV irradiation

序号	光强/ $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$	线性方程	K	R^2
1	150	$\ln(\rho_0/\rho) = 0.038\,78t_i$	0.038\,78	0.993\,8
2	250	$\ln(\rho_0/\rho) = 0.048\,69t_i$	0.048\,69	0.995\,1
3	350	$\ln(\rho_0/\rho) = 0.068\,16t_i$	0.068\,16	0.980\,4
4	450	$\ln(\rho_0/\rho) = 0.172\,74t_i$	0.172\,74	0.960\,8

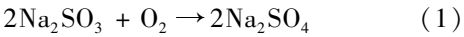
现,随着光照时间的增加,降解效率均逐步提升,最终趋向于100%,但反应速率逐步降低.这说明,光强的大小会影响还原性自由基的产生,尤其在实验初期,光强对 TCACAm 的降解有显著影响.因此确定在实验范围内,最佳光强为 450 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$.

2.1.2 还原剂投加剂量的影响

在确定合适光强后,进一步考察了 UV/ Na_2SO_3 体系中还原剂投加剂量对 TCACAm 降解效果的影响,结果如图 2 所示.在 pH 为 7、光强为 450 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 条件下,当 Na_2SO_3 投加剂量为 0.50 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,UV/ Na_2SO_3 体系无法高效降解水中的 TCACAm,这是因为投加的 Na_2SO_3 会先与溶解氧快速反应生成硫酸钠[式(1)]^[20],水中的溶解氧抑制了 UV/ Na_2SO_3 的降解效果^[26].25℃下超纯水中饱和溶解氧的含量为 8.25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,对应式(1)可得溶解氧需消耗 Na_2SO_3 约 0.52 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$,即水中溶解氧和 TCACAm 竞争 UV/ Na_2SO_3 体系中的 Na_2SO_3 ^[26].因此,当投加的还原剂剂量低于 0.50 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,溶液中可能不存在亚硫酸根离子,可假设此时紫外还原体系未能成功建立,但亚硫酸根离子固定了水中的游离氧,对后续高级还原产生的水合离子等强还原性物质起到保护作用.实验数据显示,当 Na_2SO_3 的投加剂量高于 0.50 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,UV/ Na_2SO_3 体系发挥作用.当反应 120 min 时,

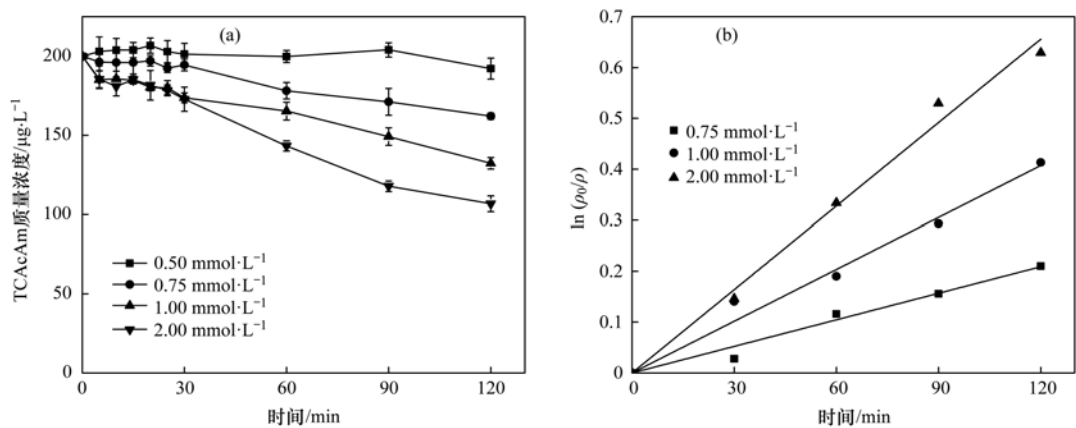
在 Na_2SO_3 的投加剂量为 0.75、1.00 和 2.00 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 条件下,水中的 TCACAm 的降解率分别为 19.0%、33.8% 和 46.7%.

结果表明,当投加的还原剂剂量高于 0.50 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,TCACAm 的降解效果在反应 120 min 内符合拟一级反应动力学特征,按照一级反应动力学公式 $\ln(\rho_0/\rho) = K \cdot t_i$ 将实验数据进行拟合[图 2(b)和表 2].从表 2 可明显看出,在实验范围内反应速率常数 K 随着还原剂投加剂量的增加而增大,反应速率加快.显然,增加 Na_2SO_3 投加剂量增强了 TCACAm 的降解效果,这与 Liu 等^[28]、Xie 等^[29] 和 Song 等^[30] 的研究结论相符.由于在实验范围内, Na_2SO_3 投加剂量为 1.00 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,TCACAm 即可被快速降解,UV/ Na_2SO_3 体系可稳定发挥作用,且成倍增加投加剂量并不能使反应速率成倍增加,所以从降解效果和经济性综合考虑,在本文后续研究中 Na_2SO_3 的投加剂量选择 1.00 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$.



2.1.3 pH 值的影响

在确认 UV₂₅₄ 光强设定为 450 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$,还原剂 Na_2SO_3 的投加剂量为 1.00 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 后,通过配制不同 pH 的缓冲溶液,考察 120 min 反应周期下初始质量浓度为 200 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 TCACAm 还原降解效果,结果如图 3 所示.



(a) 不同投加量降解 TCAcAm 效果; (b) 不同投加量降解 TCAcAm 的 $\ln(\rho_0/\rho)$ 与时间的关系

图 2 投加剂量对 TCAcAm 降解效果的影响

Fig. 2 Effect of dosage on the degradation of TCAcAm

表 2 不同投加剂量下 TCAcAm 的一级反应动力学参数

Table 2 Kinetic parameters of TCAcAm photodegradation at different dosages

序号	$\text{Na}_2\text{SO}_3/\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	线性方程	K	R^2
1	0.75	$\ln(\rho_0/\rho) = 0.00174t_i$	0.00174	0.98893
2	1.00	$\ln(\rho_0/\rho) = 0.00339t_i$	0.00339	0.99254
3	2.00	$\ln(\rho_0/\rho) = 0.00546t_i$	0.00546	0.99616

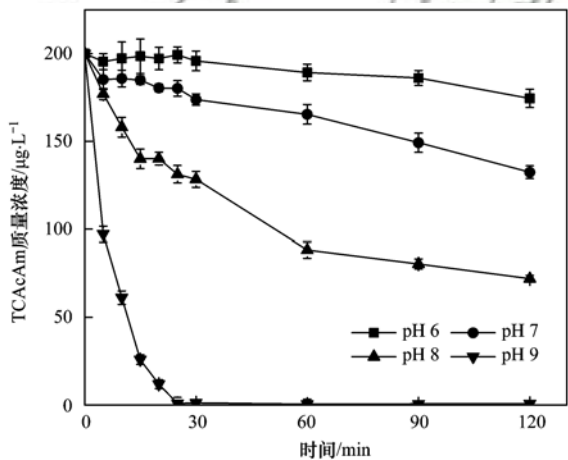


图 3 pH 对 TCAcAm 降解效果的影响

Fig. 3 Effect of pH on TCAcAm degradation

本实验结果显示,反应于 60 min 后趋于平衡, TCAcAm 的降解效率随着 pH 值的增加而增加. 在 pH 6 的条件下,反应 5 min 时 TCAcAm 的降解率仅为 5.4%,且随着时间的延长,降解率并无明显变化,可判断已基本达到反应终点;在 pH 7 和 pH 8 的条件下,反应 30 min 时 TCAcAm 降解率分别达到 17.1% 和 35.8%;在 pH 9 的条件下,反应 5 min 时 TCAcAm 降解率即可达到 51.4%,当反应 30 min 时 TCAcAm 降解率可高达 99.4%,降解效果最佳.

由此可见, pH 值的环境对反应的速率及 TCAcAm 的最终降解率均有影响,在实验范围内随着 pH 值的提高,反应速率随之提升,且 TCAcAm

的最终降解率也有较大提高,甚至可实现完全降解. Liu 等^[31]认为,由于还原性自由基对降解效率有着至关重要的影响,而 pH 值可影响吸光度,从而影响还原性自由基的产生,因此 pH 值升高,降解效率也随之升高. Vellanki 等^[32]认为与降解反应有关的自由基是由溶液中的 SO_3^{2-} 生成的, SO_3^{2-} 浓度随着 pH 值升高而增加,从而增加还原性自由基的生成. 而本次实验结果同样表明, pH 对自由基的生成有着至关重要的影响, ARP 在碱性条件下降解 TCAcAm 时可获得较好的降解率,这与 Li 等^[25]和 Liu 等^[27]的研究结论亦相符.

2.2 UV/ Na_2SO_3 体系对 TCAcAm 的降解效果分析

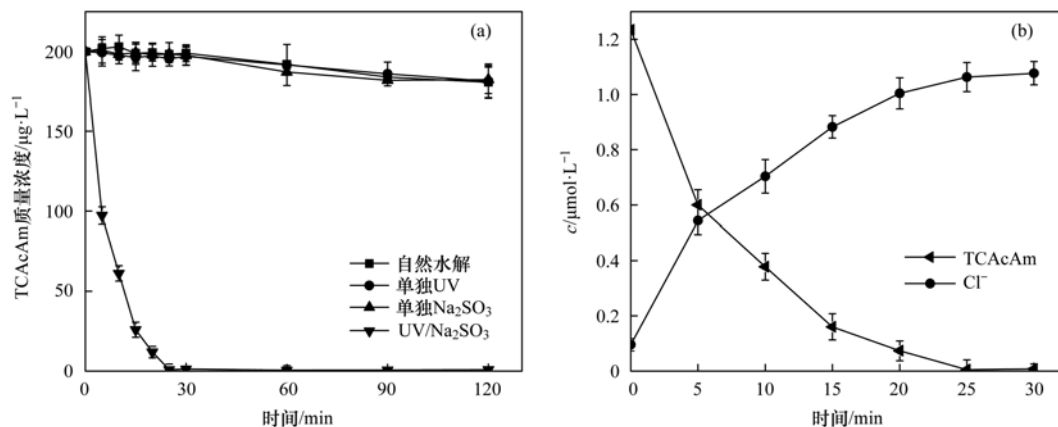
为进一步证明 UV/ Na_2SO_3 体系对 TCAcAm 具有高效还原降解效果,通过多次对比实验,考察了在 pH 9 的条件下 TCAcAm 自然水解的效果以及单独使用 UV 照射和 Na_2SO_3 还原时, TCAcAm 的降解效果,结果如图 4 所示.

本实验结果表明,在碱性条件下 TCAcAm 会发生轻微水解,单独使用 UV 照射和 Na_2SO_3 还原并不能快速降解 TCAcAm,但使用 UV/ Na_2SO_3 体系降解 TCAcAm 时, TCAcAm 可被迅速降解完全. 在单独采用 UV 光或 Na_2SO_3 降解 TCAcAm 的实验中, TCAcAm 在 30 min 内不能被快速降解的主要原因是 TCAcAm 化学结构中的 C—Cl 键具有较高键能,且在诱导效应上属于吸电子基团,而该研究所选取的 UV 光照剂量与还原剂 Na_2SO_3 并不能提供足够

的能量使 C—Cl 键断裂. 本实验数据表明, 在自然条件下反应 120 min 时 TCACAm 仅能水解 9.8%, 这之前 Chu 等^[33]的研究结论相符; 而在 UV/ Na_2SO_3 体系下反应 5 min 时, TCACAm 降解率达到 47.9%, 反应 30 min 时, TCACAm 降解率高达 99.4%. 通过多次的对比分析, 发现在 pH 为 9, Na_2SO_3 投加剂量为 $1.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, UV_{254} 光照强度

为 $450 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的条件下, UV/ Na_2SO_3 高级还原体系可经济、快速降解 TCACAm.

已知 TCACAm 在碱性条件下会发生部分水解, 但实验数据表明在 pH 9 的条件下, UV/ Na_2SO_3 体系明显加快并提高 TCACAm 的降解率, 因此在反应体系中水解路径并不占主导地位, TCACAm 水解形成 TCAA (图 5, 路径 1) 是次要反应机制^[33].

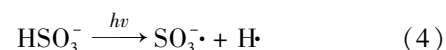
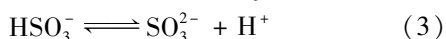
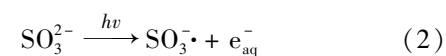


(a) 不同方式降解 TCACAm 效果; (b) UV/ Na_2SO_3 体系下 TCACAm 与 Cl^- 浓度变化

图 4 TCACAm 的降解效果

Fig. 4 Degradation of TCACAm

结果表明 Na_2SO_3 经过 UV 活化后产生的还原性自由基可将 TCACAm 脱卤^[31], 图 4(b) 中 Cl^- 的浓度变化也证明了这一点. 在碱性条件下, 经 UV 光照后产生的还原性自由基量大大提高, 这是因为溶液的 pH 值会影响水中 S 元素的存在形式, 在碱性条件下 Na_2SO_3 中的 S 主要以 SO_3^{2-} 形式存在, SO_3^{2-} 经 UV 照射后光解产生水合离子 (e_{aq}^-) 和 $\text{SO}_3^{\cdot-}$ [式(2)]. 当溶液 pH 在 6~9 范围内时, 部分 SO_3^{2-} 转化为 HSO_3^- [式(3)], HSO_3^- 在 UV 的照射下又会激发出 $\text{H}^{\cdot}$ [式(4)]^[15]. 在一般还原脱卤反应中, TCACAm 应直接被脱氯还原成二氯乙酰胺 (DCACAm), 见图 5 路径 2. 但在整个降解过程中未发现 DCACAm 的显著产生, 这可能是因为 e_{aq}^- 与 $\text{H}^{\cdot}$ 并不是体系中起主导作用的自由基. Yazdanbakhsh 等^[20]在利用 UV/ Na_2SO_3 体系降解 2,4,6-三氯苯酚时发现 $\text{SO}_3^{\cdot-}$ 的还原性远大于 e_{aq}^- 与 $\text{H}^{\cdot}$.



因此假设在 UV/ Na_2SO_3 体系降解 TCACAm 中 $\text{SO}_3^{\cdot-}$ 起主导作用, 将 TCACAm 降解生成一种未知物质 (图 5, 路径 3). 本实验室前期的研究发现, 当水中存在 $\text{SO}_3^{\cdot-}$ 时, TCACAm 会与 $\text{SO}_3^{\cdot-}$ 发生双

分子亲核取代反应, 形成一种新的产物, 即 2-磺酸基-2,2-二氯乙酰胺 (DCACAm-sulfonate)^[34]. Song 等^[30]在研究全氟辛酸降解过程中也推测出类似产物. 因此, 笔者推测 UV 照射后产生的强亲核基团 $\text{SO}_3^{\cdot-}$ 直接由背面进攻 TCACAm 的仲碳原子, C—S 键的形成与 C—Cl 键的断裂同时发生, 此时形成一种不稳定的一碳五键的反应中间体, 随后 Cl^- 离去, 形成最终产物 DCACAm-sulfonate, 完成取代反应. 由此推测其可能的降解路径 (路径 3) 如图 5 所示, 后续研究将对 TCACAm 的降解产物做进一步鉴定.

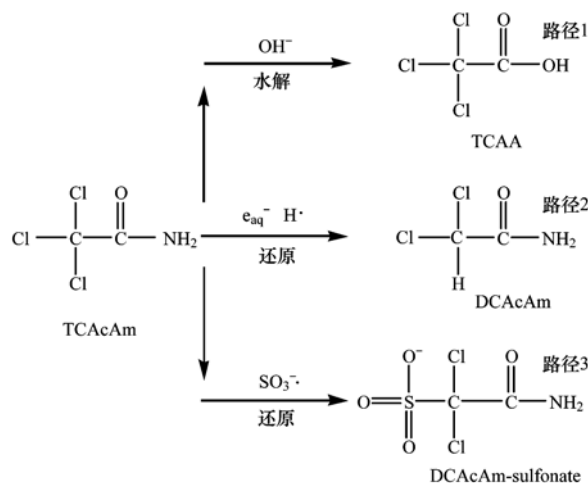


图 5 TCACAm 降解路径

Fig. 5 Reaction pathways of TCACAm

3 结论

(1) 相比于单独使用 UV 和单独投加还原剂, UV/ Na_2SO_3 体系中产生的强还原性 $\text{SO}_3^{\cdot-}$ 可高效降解 TCACAm, 实现 TCACAm 的快速还原。

(2) 在 UV/ Na_2SO_3 体系中, 光强对 TCACAm 的降解有一定影响, 在反应初期较为明显, 前 30 min 内 TCACAm 的降解率随着光强的增加而显著增加。

(3) 在 UV/ Na_2SO_3 体系中, 当还原剂 Na_2SO_3 投加剂量大于 $0.50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 对 TCACAm 的降解效果明显, 且 TCACAm 的降解效率随着投加剂量的增加而提高。

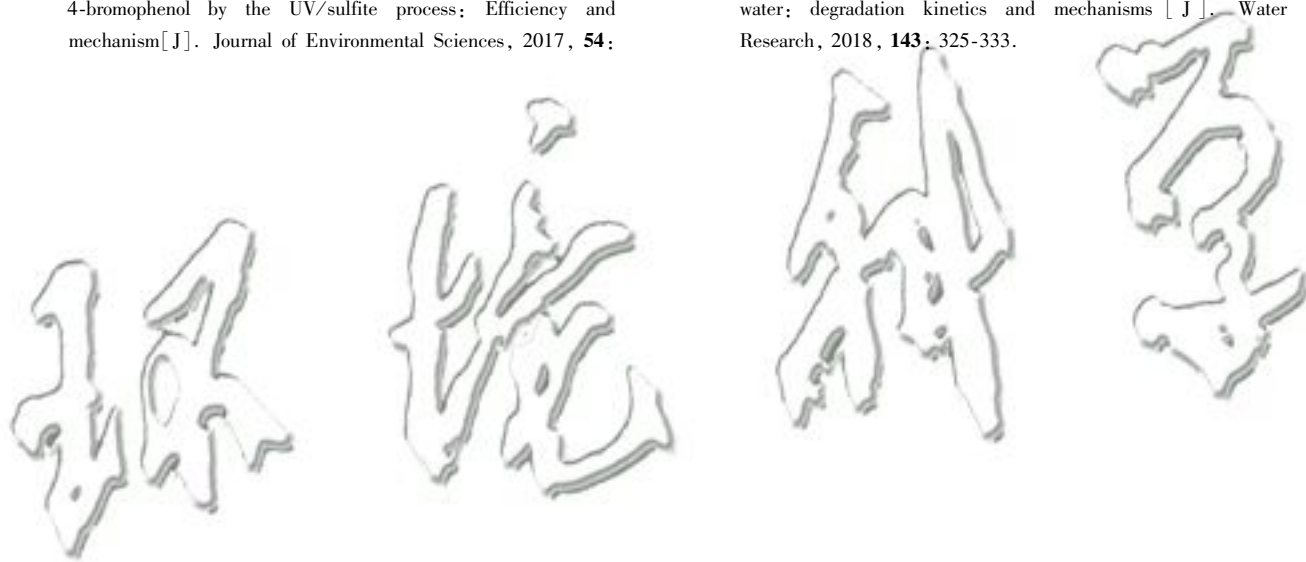
(4) 通过对比不同实验条件下 TCACAm 的降解效果, 发现 pH 值对 UV/ Na_2SO_3 体系的还原效果影响明显, 在碱性条件可以大幅提升 TCACAm 的降解速率和最终降解效果。

(5) UV/ Na_2SO_3 体系可高效还原卤代有机物, 对降解饮用水中卤代 DBPs 具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] Richardson S D, Plewa M J, Wagner E D, *et al.* Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-products in drinking water: a review and roadmap for research [J]. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 2007, **636**(1-3): 178-242.
- [2] 王尧, 叶素红, 章大山. Q 市给水系统中消毒副产物的变化研究[J]. *中国给水排水*, 2018, **34**(9): 44-46.
Wang Y, Ye S H, Zhang D S. Variation of disinfection by-products in domestic drinking water in Q City[J]. *China Water and Wastewater*, 2018, **34**(9): 44-46.
- [3] Chu W H, Gao N Y, Krasner S W, *et al.* Formation of halogenated C-, N-DBPs from chlor(am)ination and UV irradiation of tyrosine in drinking water[J]. *Environmental Pollution*, 2012, **161**: 8-14.
- [4] Bond T, Huang J, Templeton M R, *et al.* Occurrence and control of nitrogenous disinfection by-products in drinking water-A review[J]. *Water Research*, 2011, **45**(15): 4341-4354.
- [5] Chu W H, Gao N Y, Deng Y, *et al.* Formation of nitrogenous disinfection by-products from pre-chloramination [J]. *Chemosphere*, 2011, **85**(7): 1187-1191.
- [6] Richardson S D, Thruston A D, Caughran T V, *et al.* Identification of new ozone disinfection byproducts in drinking water[J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, **33**(19): 3368-3377.
- [7] 高乃云, 楚文海, 徐斌. 从生成机制谈饮用水中新型消毒副产物的控制策略[J]. *给水排水*, 2017, **43**(2): 1-5.
- [8] Chu W H, Gao N Y, Yin D Q, *et al.* Trace determination of 13 haloacetamides in drinking water using liquid chromatography triple quadrupole mass spectrometry with atmospheric pressure chemical ionization[J]. *Journal of Chromatography A*, 2012, **1235**: 178-181.
- [9] Plewa M J, Muellner M G, Richardson S D, *et al.* Occurrence, synthesis, and mammalian cell cytotoxicity and genotoxicity of haloacetamides: an emerging class of nitrogenous drinking water disinfection byproducts [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(3): 955-961.
- [10] 赵玉丽, 李杏放. 饮用水消毒副产物: 化学特征与毒性[J]. *环境化学*, 2011, **30**(1): 20-33.
Zhao Y L, Li X F. Drinking water disinfection byproducts: chemical characterization and toxicity [J]. *Environmental Chemistry*, 2011, **30**(1): 20-33.
- [11] Krasner S W, Weinberg H S, Richardson S D, *et al.* Occurrence of a new generation of disinfection byproducts[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(23): 7175-7185.
- [12] Liew D, Linge K L, Joll C A, *et al.* Determination of halonitromethanes and haloacetamides: an evaluation of sample preservation and analyte stability in drinking water[J]. *Journal of Chromatography A*, 2012, **1241**: 117-122.
- [13] Kosaka K, Ohkubo K, Akiba M. Occurrence and formation of haloacetamides from chlorination at water purification plants across Japan[J]. *Water Research*, 2016, **106**: 470-476.
- [14] Zhang Y, Zhang Z Y, Zhao Y P, *et al.* Identifying health effects of exposure to trichloroacetamide using transcriptomics and metabolomics in mice (*Mus musculus*) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(6): 2918-2924.
- [15] 杨世迎, 张宜涛, 郑迪. 高级还原技术: 一种水处理新技术[J]. *化学进展*, 2016, **28**(6): 934-941.
Yang S Y, Zhang Y T, Zheng D. Advanced reduction processes: a novel technology for water treatment [J]. *Progress in Chemistry*, 2016, **28**(6): 934-941.
- [16] Yu H, Nie E, Xu J, *et al.* Degradation of diclofenac by advanced oxidation and reduction processes: kinetic studies, degradation pathways and toxicity assessments [J]. *Water Research*, 2013, **47**(5): 1909-1918.
- [17] Li X C, Ma J, Liu G F, *et al.* Efficient reductive dechlorination of monochloroacetic acid by sulfite/UV process [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(13): 7342-7349.
- [18] Liu X, Vellanki B P, Batchelor B, *et al.* Degradation of 1, 2-dichloroethane with advanced reduction processes (ARPs): effects of process variables and mechanisms [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, **237**: 300-307.
- [19] Kaushik V, Duan Y H, Jung B, *et al.* Arsenic removal using advanced reduction process with dithionite/UV—A kinetic study [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2018, **23**: 314-319.
- [20] Yazdanbakhsh A, Eslami A, Moussavi G, *et al.* Photo-assisted degradation of 2, 4, 6-trichlorophenol by an advanced reduction process based on sulfite anion radical: degradation, dechlorination and mineralization [J]. *Chemosphere*, 2018, **191**: 156-165.
- [21] Vellanki B P, Batchelor B, Abdel-Wahab A. Advanced reduction processes: a new class of treatment processes [J]. *Environmental Engineering Science*, 2013, **30**(5): 264-271.
- [22] 韩慧丽, 王宏杰, 董文艺. 真空紫外-亚硫酸盐法降解 PFOS 影响因素[J]. *环境科学*, 2017, **38**(4): 1477-1482.
Han H L, Wang H J, Dong W Y. Influencing factors on the degradation of PFOS through VUV- SO_3^{2-} [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1477-1482.
- [23] Chu W H, Ding S K, Bond T, *et al.* Zero valent iron produces dichloroacetamide from chloramphenicol antibiotics in the absence of chlorine and chloramines[J]. *Water Research*, 2016, **104**: 254-261.
- [24] Gu Y, Dong W, Luo C, *et al.* Efficient reductive decomposition of perfluorooctanesulfonate in a high photon flux UV/sulfite

- system[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50** (19): 10554-10561.
- [25] Li X C, Fang J Y, Liu G F, *et al.* Kinetics and efficiency of the hydrated electron-induced dehalogenation by the sulfite/UV process[J]. *Water Research*, 2014, **62**: 220-228.
- [26] Xiao Q, Ren Y F, Yu S L. Pilot study on bromate reduction from drinking water by UV/sulfite systems: economic cost comparisons, effects of environmental parameters and mechanisms [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, **330**: 1203-1210.
- [27] Liu X, Yoon S, Batchelor B, *et al.* Degradation of vinyl chloride (VC) by the sulfite/UV advanced reduction process (ARP): effects of process variables and a kinetic model[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **454-455**: 578-583.
- [28] Liu X W, Zhang T Q, Shao Y. Aqueous bromate reduction by UV activation of sulfite[J]. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 2014, **42** (10): 1370-1375.
- [29] Xie B H, Li X C, Huang X F, *et al.* Enhanced debromination of 4-bromophenol by the UV/sulfite process: Efficiency and mechanism[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, **54**: 231-238.
- [30] Song Z, Tang H Q, Wang N, *et al.* Reductive defluorination of perfluorooctanoic acid by hydrated electrons in a sulfite-mediated UV photochemical system[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **262**: 332-338.
- [31] Liu X, Yoon S, Batchelor B, *et al.* Photochemical degradation of vinyl chloride with an advanced reduction process (ARP)-effects of reagents and pH[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, **215-216**: 868-875.
- [32] Vellanki B P, Batchelor B. Perchlorate reduction by the sulfite/ultraviolet light advanced reduction process [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **262**: 348-356.
- [33] Chu W H, Gao N Y, Deng Y. Stability of newfound nitrogenous disinfection by-products haloacetamides in drinking water[J]. *Chinese Journal of Organic Chemistry*, 2009, **29** (10): 1569-1574.
- [34] Ding S K, Wang F F, Chu W H, *et al.* Rapid degradation of brominated and iodinated haloacetamides with sulfite in drinking water: degradation kinetics and mechanisms [J]. *Water Research*, 2018, **143**: 325-333.



CONTENTS

Pollution Characteristics and Regional Transport of Atmospheric Particulate Matter in Beijing from October to November, 2016	ZHANG Han-yu, CHENG Shui-yuan, YAO Sen, <i>et al.</i> (1999)
Chemical Compositions, Mass Concentrations, and Emission Factors of Particulate Organic Matters Emitted from Catering	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, QIAO Li-ping (2010)
Size Distributions of Aerosol During the Summer at the Summit of Mountain Taishan (1534 m) in Central East China	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, YIN Yan, <i>et al.</i> (2019)
Concentration Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang	YAN Guang-xuan, ZHANG Pu-zhen, HUANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2027)
Scenario Analysis of PM _{2.5} Concentration Targets and Milestones in China	HE Jin-yu, YAN Li, WANG Yan-chao, <i>et al.</i> (2036)
PM _{2.5} Emission Characteristics and Estimation of Emission Reduction Potential from Typical Industrial Sources in Anyang	DU Xiao-shen, YAN Li, HE Jin-yu, <i>et al.</i> (2043)
Emission Characteristics and List of Inorganic Elements in Fine Particles of Typical Industrial Kilns in Zhengzhou City	ZHAO Qing-yan, HAN Shi-jie, ZHANG Yi-shun, <i>et al.</i> (2052)
Composition and Atmospheric Reactivity of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in the Urban Area of Nanjing, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (2062)
Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol of VOCs from Fossil Fuel Combustion in Lanzhou City	LIU Zhen, ZHU Yu-fan, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (2069)
Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees	LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, LI Qi, <i>et al.</i> (2078)
Ion Concentrations and Their Spatial Variability in Underground Water and Surface Water in Typical Terrestrial Ecosystems in China	HUANG Li, ZHANG Xin-yu, YUAN Guo-fu, <i>et al.</i> (2086)
Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments	LIU Xi, WANG Zhi, WANG Xue-lei, <i>et al.</i> (2094)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Bodies in Seven Basins of China	FAN Bo, WANG Xiao-nan, HUANG Yun, <i>et al.</i> (2101)
Occurrence, Input, and Seasonal Variations of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Rivers and Drain Outlets from the Dalian Coastal Area, China	CHEN Hong, HAN Jian-bo, ZHANG Can, <i>et al.</i> (2115)
Space-time Characteristics and Environmental Significance of Stable Isotopes in Precipitation at an Arid Inland River Basin	YUAN Rui-feng, LI Zong-xing, CAI Yu-qin, <i>et al.</i> (2122)
Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment	HUNAG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (2132)
Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2143)
Analysis of Transport and Transformation Characteristics Between Dissolved Phosphorus and Particulate Phosphorus in Water of the Three Gorges Reservoir	QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2152)
Vertical Distribution Profiles and Release Potential of Mainstream Column Sediments in the Three Gorges Reservoir After Impoundment to 175 m	LI Rui, PAN Chan-juan, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2160)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in the Dongting Lake at Different Water Periods	LI Ying-jie, WANG Li-jing, LI Hong, <i>et al.</i> (2170)
Effects of Exogenous Carbon Addition on Equilibrium Phosphate Concentration and Risk of Phosphorus Release from Sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, DAI Yuan (2178)
Spatial Distribution of Organic Phosphorus in Sediment and Its Environmental Implication in the Upper Stream of Minjiang River	XU Jian, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2186)
Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed	JIANG Qian-wen, LIU Feng, PENG Ying-xiang, <i>et al.</i> (2194)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin	ZHANG Jie, GUO Xi-ya, ZENG Ye, <i>et al.</i> (2202)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in the Water of the Ruxi River Estuary, a Typical Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	MA Wei-bin, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2211)
Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland	LIU Wei-hao, WANG Yong-min, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (2219)
Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands	FAN Yu-fei, LIU Wei-hao, SUN Tao, <i>et al.</i> (2226)
Effects of Microplastics on Antibiotic Resistance Genes in Estuarine Sediments	HUANG Fu-yi, YANG Kai, ZHANG Zi-xing, <i>et al.</i> (2234)
Comparison and Source Apportionment of PAHs Pollution of Runoff from Roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai	WU Jie, XIONG Li-jun, WU Jian, <i>et al.</i> (2240)
Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China	WANG Zhen-fang, ZHANG Wei, YANG Li, <i>et al.</i> (2249)
Algal Bloom and Mechanism of Hypoxia in the Metalimnion of the Lijiahe Reservoir During Thermal Stratification	LIU Xue-qing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2258)
Allelopathic Effects and Allelochemicals of <i>Myriophyllum elatinoide</i> s on <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Selenastrum capricornutum</i>	BI Ye-liang, WU Shi-min, ZHOU Si-ning, <i>et al.</i> (2265)
Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite	FU Zhi-xuan, GUO Ying-qing, CHU Wen-hai (2271)
Influencing Factors and Transformation Mechanism of Venlafaxine Degradation by UV	LÜ Juan, XU Zhi-wei, WANG Yan (2278)
Mechanism of Synergistic Adsorption of Arsenic and Cadmium by Aluminium-substituted Ferrihydrites	HUANG Bo, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (2287)
Fluoride Removal Efficiency of Novel Material: Magnetite Core/Zirconia Shell Nanocomposite	FANG Wen-can, LI Xiao-di, FANG Jing, <i>et al.</i> (2295)
Impact Mechanisms of Carboxyl Group Modified Cathode on Acetate Production in Microbial Electrosynthesis Systems	QI Jia-xin, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (2302)
Partial Nitrification and Denitrification of Low C/N Ratio Sewage Based on Zoning Oxygen and Dissolved Oxygen Control	WU Chun-lei, RONG Yi, LIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (2310)
Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations	MA Yan-hong, ZHAO Zhi-chao, AN Fang-jiao, <i>et al.</i> (2317)
Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15°C SBBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (2326)
Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of <i>Accumulibacter</i> in AO-SBR System	WANG Shao-po, LI Zhu, ZHAO Le-dan, <i>et al.</i> (2333)
Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics	YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, <i>et al.</i> (2341)
Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria	LIU Xiang-yang, ZHANG Qian, WU Heng, <i>et al.</i> (2349)
Effect of Different Temperatures on the Performance of Autotrophic Nitrogen Removal and Microbial Community from Swine Wastewater	HUANG Fang-yu, DENG Liang-wei, YANG Hong-nan, <i>et al.</i> (2357)
Characteristics and Regional Heterogeneity of Eukaryotic Microbial Community in Wastewater Treatment Plants	QIN Wen-tao, ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, <i>et al.</i> (2368)
Effects of Wetland Reclamation on Soil Microbial Community Structure in the Sanjiang Plain	WANG Na, GAO Jie, WEI Jing, <i>et al.</i> (2375)
Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes	LIU Jin-xian, LI Cui, LUO Zheng-ming, <i>et al.</i> (2382)
Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, WANG Cong, <i>et al.</i> (2394)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on CH ₄ Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, JIANG Chang-sheng, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (2404)
Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods	WANG Xiao-yun, CAI Huan-jie, LI Liang, <i>et al.</i> (2413)
Effects of Different Fertilization Modes on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Paddy Fields in Hot Areas	TIAN Wei, WU Yan-zheng, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (2426)
Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil	ZENG Man-man, CI En, FAN Jing-jing, <i>et al.</i> (2435)
Cd Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Paddy Soil in High Cadmium Anomaly Area of Guangxi	SONG Bo, WANG Fo-peng, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (2443)
Remediation Potential of <i>Ageratum conyzoides</i> L. on Cadmium Contaminated Farmland	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, BIN Juan, <i>et al.</i> (2453)
Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting <i>Lactuca sativa</i> L.	JIAO Hai-hua, GUO Jia-jia, ZHANG Jing-min, <i>et al.</i> (2460)
Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil	SHU Xin, LI Yan, LI Feng, <i>et al.</i> (2471)
Pollution Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Around a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant	LÜ Zhan-lu, ZHANG Jin-liang, LU Shao-you, <i>et al.</i> (2483)