

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

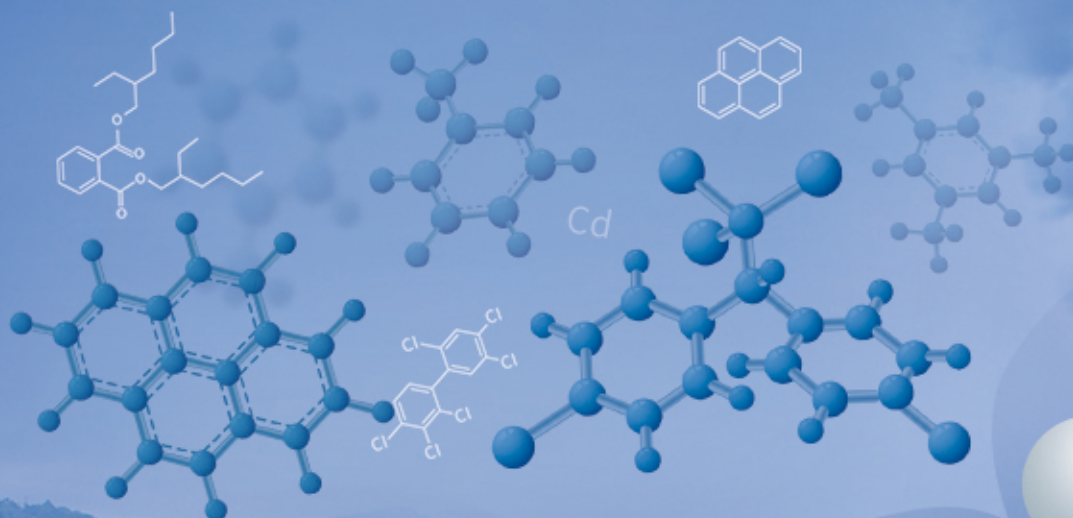
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

升金湖水体优先污染物筛选与风险评价

龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华



PAHs

VOCs

HMs

PCBs

PAEs

OCPs

ANTs

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年10月

第42卷 第10期
Vol.42 No.10

目次

PM _{2.5} 化学组分连续观测在污染事件源解析中的应用	蔡凡涛, 尚玥, 戴维, 谢鸣捷 (4575)
汾渭平原 PM _{2.5} 空间分布的地形效应	黄小刚, 赵景波, 孙从建, 汤慧玲, 梁旭琦 (4582)
华中地区冬季灰霾天气下 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价: 以湖北黄冈为例	李星谕, 毛瑶, 陈展乐, 刘威杰, 程铖, 石明明, 许安, 苏业旺, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (4593)
华北区域大气中羰基化合物体积分数水平及化学反应活性	黄禹, 陈曦, 王迎红, 刘子锐, 唐贵谦, 李杏茹 (4602)
成都市春季 O ₃ 污染特征及关键前体物识别	韩丽, 陈军辉, 姜涛, 徐晨曦, 李英杰, 王成辉, 王波, 钱骏, 刘政 (4611)
基于边界观测的长三角某工业区 O ₃ 来源特征	黄晴, 黄银芝, 张珊, 金丹, 高松, 修光利 (4621)
廊坊开发区 8~9 月 O ₃ 污染过程 VOCs 污染特征及来源分析	张敬巧, 王宏亮, 方小云, 刘锐泽, 丁文文, 凌德印, 王淑兰 (4632)
广东省家具行业基于涂料类型的 VOCs 排放特征及其环境影响	曾春玲, 邵霞, 刘锐源, 姚懿娟, 李银松, 侯墨, 刘洋, 范丽雅, 叶代启 (4641)
厦门湾空气质量对新冠疫情管控的响应	徐超, 吴水平, 刘怡靖, 钟雪芬 (4650)
北京平原和延庆地区山谷风异同及对污染的影响	吴进, 李琛, 马志强, 孙兆彬, 韩婷婷, 邱雨露, 马小会, 李颖若, 朱晓娟 (4660)
两湖盆地冬季区域大气颗粒物污染特征及独特的风场和下垫面影响	朱燕, 赵天良, 白永清, 徐家平, 孙晓芸, 胡未央, 常嘉成, 杨婕, 朱从祯 (4669)
燃煤电厂颗粒物中硫酸根与硝酸根离子的转化规律	杨柳, 何晴, 盛重义 (4678)
长江流域主要干/支流化学特征及外源酸的影响	王琪, 于爽, 蒋萍萍, 孙平安 (4687)
土地利用对太湖入湖河道营养盐的影响	连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 康丽娟, 朱梦圆, 许海 (4698)
基于 eDNA 技术的渭河浮游动物多样性及关键种生态位特征	梁东, 夏军, 宋进喜, 常剑波, 吴琼, 程丹东, 张怡恒, 孔飞鹤, 任源鑫 (4708)
三亚市水体中 PPCPs 的污染水平、分布特征及生态风险评价	任丙南, 耿静 (4717)
升金湖水体优先污染物筛选与风险评价	龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华 (4727)
天目湖沙河水库水生态安全状况长期变化及影响因素	杨文斌, 段文秀, 崔扬, 朱广伟, 吴天浩, 许海, 朱梦圆 (4739)
华中地区供水水库抗生素抗性基因的季节变化及影响因素	张凯, 辛蕊, 李观家, 王倩, 王亚南, 许智恒, 崔向超, 魏巍 (4753)
快速城镇化进程中珠江三角洲硝酸型地下水赋存特征及驱动因素	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 张玉玺 (4761)
盐城地区地表水化学空间特征及控制因素分析	王建, 张华兵, 许君利, 彭俊 (4772)
基于沉积物中总氮和总磷垂向分布与吸附解吸特征的白洋淀清淤深度	周亚婷, 陈兴宏, 李立青, 张伟军, 张美一, 王东升, 王洪杰 (4781)
硼酸和磷酸对 PMS/Co ²⁺ 均相催化氧化有机物的影响因素与机制	万琪琪, 陈铸昊, 曹瑞华, 王静怡, 文刚 (4789)
磁性生物炭负载 α-MnO ₂ 活化过一硫酸盐降解 2,2',4,4'-四溴联苯醚	李鑫, 尹华, 罗昊昱, 欧阳晓芳, 刘航, 祝铭韩 (4798)
紫外活化过硫酸钠灭活水中噬菌体 MS2 的特性及机制	张崇森, 杨昊明, 王真 (4807)
铈改性水葫芦生物炭对磷酸盐的吸附特性	王光泽, 曾薇, 李帅帅 (4815)
低温地下水净化工艺中氨氮去除性能及机制	李冬, 刘孟浩, 张瑞苗, 曾辉平, 张杰 (4826)
我国城市污泥中重金属的赋存形态与生态风险评价	耿源濂, 张传兵, 张勇, 黄豆豆, 闫姝晓, 孙腾飞, 程柳, 王静, 毛宇翔 (4834)
不同气候类型下污水厂活性污泥中微生物群落比较	杨思航, 秦泽生, 梁漫春 (4844)
部分亚硝化-厌氧氨氧化协同反硝化处理生活污水脱氮除碳	秦彦荣, 袁忠玲, 张明, 张民安, 刘安迪, 付雪, 马娟, 陈永志 (4853)
同步短程硝化-厌氧氨氧化-短程反硝化颗粒污泥培育过程及其性能	周峰, 刘勇弟, 厉巍 (4864)
多种微塑料提取方法在中国典型土壤中的应用	赵小丽, 刘子涵, 从辰宇, 韩剑桥 (4872)
柴达木盆地表土重金属污染与来源分析	陈亮, 张西营, 唐启亮, 耿盛, 王二龙, 李姜瑶 (4880)
快速城市化区域不同用地类型土壤重金属含量分布特征及生态风险	李梦婷, 沈城, 吴健, 黄沈发, 李大雁, 王敏 (4889)
广西都安县典型水田晒地球化学特征及影响因素	刘飞, 杨柯, 徐仁廷, 唐世琪 (4897)
炭化苹果枝通过减少土壤 DTPA-Cd 降低苹果砷木镉积累和镉伤害	邓波, 荀咪, 张玮玮, 杨洪强 (4908)
海南省集约化种植园中谷物、蔬菜和水果中重金属累积程度及健康风险	杨剑洲, 王振亮, 高健翁, 严慧, 胡树起, 唐世新, 龚晶晶 (4916)
环境中抗生素抗性基因丰度与抗生素和重金属含量的相关性分析: 基于 Web of Science 数据库检索	苗荪, 陈磊, 左剑恶 (4925)
银川市农田土壤中四环素类抗生素的污染特征及生态风险评估	张小红, 陶红, 王亚娟, 马志义, 周泽英 (4933)
施用不同来源粪肥对土壤中抗生素淋溶的影响	李斌绪, 朱昌雄, 宋婷婷, 马金莲, 张治国, 李红娜 (4942)
我国典型森林土壤微生物驱动的氮代谢途径特征解析	吕雪丽, 赵永鹏, 林清火, 彭显龙, 尹云锋, 蒋先军 (4951)
青藏高原高寒湿地春夏两季根际与非根际土壤反硝化速率及 nirS 型反硝化细菌群落特征分析	李玉倩, 马俊伟, 高超, 霍守亮, 夏星辉 (4959)
松嫩平原芦苇湿地退化与修复过程中土壤细菌和甲烷代谢微生物的群落结构	王秋颖, 王娜, 刘颖, 陈功, 何辉, 高婕, 庄绪亮, 庄国强 (4968)
不同轮作休耕下潮土细菌群落结构特征	南镇武, 刘柱, 代红翠, 张磊, 王娜, 徐杰, 刘开昌, 孟维伟, 王旭清 (4977)
稻田土壤光合细菌群落对镉污染的响应	罗路云, 金德才, 王殿东, 陈昂, 张德咏, 曾军, 匡炜, 张卓, 刘勇 (4988)
铁尾矿芦苇根际微生物和根内生菌群落分布及其限制性因子解析	曹曼曼, 王飞, 周北海, 陈辉伦, 袁蓉芳 (4998)
有机无机氮配施对不同程度盐渍土硝化和反硝化作用的影响	周慧, 史海滨, 张文聪, 王维刚, 苏永德, 闫妍 (5010)
水稻产量、稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放对长期大气 CO ₂ 浓度升高的响应	于海洋, 宋开付, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (5021)
原料和热解温度对生物炭中可溶性有机质的影响	闫代红, 马亚培, 宋凯悦, 马红亮, 高人, 尹云锋 (5030)
中国 84 个主要城市大气热岛效应的时空变化特征及影响因素	李宇, 周德成, 闫章美 (5037)
室内建筑装饰装修材料气味物质及其释放研究进展	张万众, 张彭义 (5046)
《环境科学》征订启事 (4814) 《环境科学》征稿简则 (4871) 信息 (4907, 5009, 5029)	

紫外活化过硫酸钠灭活水中噬菌体 MS2 的特性及机制

张崇森^{1,2,3}, 杨昊明^{1,2,3}, 王真^{1,2,3}

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710055; 3. 西安建筑科技大学陕西省环境工程重点实验室, 西安 710055)

摘要: 水环境中的病毒对常见的消毒技术有较强的抵抗力. 为了开发水中病毒的高效灭活技术, 以噬菌体 MS2 为对象, 研究紫外活化过硫酸钠(UV/PS)体系灭活病毒的特性和机制. 采用双层平板法对噬菌体 MS2 进行定量检测, 研究 UV/PS 对水样中噬菌体 MS2 的灭活率和动力学特征, 并考察 PS 用量、pH 值和噬菌体初始浓度等因素对灭活效果的影响. 利用透射扫描电镜观察 UV/PS 处理前后噬菌体的形貌, 利用电子顺磁共振波谱法确认反应体系中存在的自由基种类. 在自由基淬灭实验的基础上, 分析计算 UV/PS 体系中各因素对噬菌体灭活的贡献率. 结果表明, 当紫外辐照强度为 $160 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, UV/PS 处理 4 min 即可去除 4.39 lg 的噬菌体 MS2, 较单独使用同样辐照剂量的 UV 消毒灭活率高 1.44 lg. UV/PS 体系对噬菌体 MS2 的灭活动力学过程符合一级反应动力学模型. 增加体系中的 PS 初始浓度能明显提高对噬菌体的灭活率和灭活速率, 而 pH 和噬菌体初始浓度对 UV/PS 灭活噬菌体的影响较小. UV/PS 处理可导致噬菌体的衣壳破损, 促进了噬菌体颗粒团聚. UV/PS 体系中存在 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 和 $\cdot\text{OH}$, 是噬菌体 MS2 灭活的重要因素. $\cdot\text{OH}$ 比 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 对噬菌体 MS2 灭活的贡献更大.

关键词: 紫外活化; 过硫酸钠; 噬菌体 MS2; 灭活; 自由基

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)10-4807-08 DOI: 10.13227/j.hjks.202102068

Characteristics and Mechanisms of Bacteriophage MS2 Inactivation in Water by UV Activated Sodium Persulfate

ZHANG Chong-miao^{1,2,3}, YANG Hao-ming^{1,2,3}, WANG Zhen^{1,2,3}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Key Laboratory of Northwest Water Resource, Environment and Ecology, Ministry of Education, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Viruses in the aquatic environment have strong resistance to common disinfection techniques. To contribute to the development of efficient virus inactivation technologies, the characteristics and mechanisms of virus inactivation in a UV activated sodium persulfate (UV/PS) system were studied. The inactivation rate and kinetic characteristics of bacteriophage MS2 in water samples by the UV/PS were studied. The effects of PS dosage, pH, and the initial concentration of bacteriophages on the inactivation effect were also investigated. Furthermore, the morphologies of phages before and after UV/PS treatment were observed by transmission scanning electron microscope, and the free radicals in the reaction system were identified by electron paramagnetic resonance spectroscopy. By means of a free radical quenching experiment, the contribution rate of various factors in the UV/PS system to phage inactivation was also analyzed and calculated. The results showed that when the UV irradiation intensity was $160 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$, the phage MS2 of 4.39 lg could be removed after UV/PS treatment for 4 min, which was 1.44 lg higher than that of the same UV dose alone. The inactivation of phage MS2 by the UV/PS system was in accordance with the first-order kinetic model. Increasing the initial concentration of PS in the system significantly improved the inactivation rate of phages, while pH and the initial concentration of phages had little effect on the inactivation rate. UV/PS treatment damages the capsid of phages and promotes the aggregation of phage particles. The presence of $\text{SO}_4^{\cdot-}$ and $\cdot\text{OH}$ in the UV/PS system was an important factor for the inactivation of MS2 phages. Finally, $\cdot\text{OH}$ contributed more to MS2 phage inactivation than $\text{SO}_4^{\cdot-}$.

Key words: UV activation; sodium persulfate; phage MS2; inactivation; free radical

病毒是人类健康的最大威胁之一^[1], 在污水^[2]、地表水^[3]、地下水^[4]甚至饮用水^[5]中都发现了对人类致病的病毒. 病毒个体微小, 对不利环境条件抵抗力强^[6]. 紫外线 (ultraviolet, UV) 消毒具有杀菌效率高、操作方便和无消毒副产物生成等优点, 广泛应用于污水和饮用水的消毒处理中. 紫外线对水中细菌的杀灭能力较强, 但对病毒的灭活却比较有限^[7].

活化过硫酸盐 (persulfate, PS) 氧化技术可在相对温和的条件下产生氧化性极强的自由基, 作为一种新型的高级氧化技术而颇受青睐. 相较其他活化方式^[8], 紫外线活化硫酸盐 (UV/PS) 技术在水处理

中应用广泛, 已在水中磺胺甲噁唑^[9]、双氯芬酸^[10]和三氯生等^[11]有机污染物的去除方面显示出了良好的效果. 然而, UV/PS 技术在病原微生物的灭活方面鲜见报道, 特别是对于个体微小且抵抗力强的病毒, 其灭活效果不甚清楚^[12]. UV/PS 技术是否能够有效弥补 UV 消毒技术的不足亟待明确.

鉴于此, 本文选取噬菌体 MS2 作为研究对象, 系统分析 UV/PS 对噬菌体的灭活率、灭活动力学

收稿日期: 2021-02-07; 修订日期: 2021-03-31

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFE0127300); 陕西省重点研发计划项目 (2020ZDLNY06-07)

作者简介: 张崇森 (1978 ~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为水环境微生物风险评价与控制, E-mail: cmzhang@xauat.edu.cn

和影响因素,并通过灭活前后的噬菌体微观形貌对比和自由基鉴定,探究了 UV/PS 对病毒的灭活机制,以期开发水中病毒高效灭活技术,保障用水安全提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 噬菌体与宿主菌株

大肠杆菌噬菌体 MS2 和大肠杆菌 BW39773 均购自中国典型培养物保藏中心。使用液体 Luria-Bertain (LB) 培养基或固体 LB 平板培养大肠杆菌 BW39773 作为 MS2 的宿主菌。

将大肠杆菌 BW39773 培养至对数期,浓度达到约 $10^5 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。按照感染复数 (MOI) 为 1:1 的比例将噬菌体 MS2 与大肠杆菌 BW39773 混合均匀,静置 15 min, $10\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min,弃上清,沉淀用 5 mL LB 重悬, 37°C 摇床培养 5 h 后 $10\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min,取上清液经 $0.22 \mu\text{m}$ 孔径的滤膜过滤后备用。

1.2 噬菌体 MS2 的双层平板法定量检测

取 $100 \mu\text{L}$ 含有噬菌体 MS2 的样品,与 $100 \mu\text{L}$ 活化至对数期、浓度约 $10^5 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的宿主菌液混合均匀,加入到 3 mL 0.45% 的琼脂 (55°C) 中混匀,倾倒入 1.5% 的琼脂平板表面。待在室温下凝固后,倒置于培养箱中。经 37°C 培养 12 h 后取出,进行噬菌斑计数。每个样品做 3 个梯度稀释,每个稀释度做 3 个平行样。

1.3 噬菌体 MS2 灭活实验

将一定量的噬菌体 MS2 加入到 30 mL 超纯水中,混匀后置于无菌培养皿中。投加一定量过硫酸钠,使用 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的稀 H_2SO_4 或 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH 溶液调节 pH 值。将含有噬菌体 MS2 的水样置于紫外平行光束仪中的样品台上,使用 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的磁力搅拌保证水样始终均匀。使用预热 20 min 后的低压紫外灯 (ZW15S19w 型,巨光,主波长 253.7 nm) 照射水样,用校准后的紫外辐照计 (UV-B 型,北师大光电仪器厂) 确定样品处的紫外辐照强度为 $160 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$,通过调整辐照时间,获得不同的紫外辐照剂量。

使用移液器采集经一定时间紫外辐照后的水样 $300 \mu\text{L}$,使用双层平板法检测水样中的噬菌体 MS2 浓度。所有条件下的实验均重复 3 次,结果取平均值。

根据式(1)计算噬菌体 MS2 的灭活率:

$$R = \lg(N_0/N_t) \quad (1)$$

式中, R 为灭活率; N_0 为体系中噬菌体 MS2 初始浓度, $\text{PFU} \cdot \text{mL}^{-1}$; N_t 为 t 时刻噬菌体 MS2 的浓度,

$\text{PFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。

分别使用 UV 消毒、单独 PS 和 UV/PS 处理含噬菌体 MS2 的水样,比较噬菌体 MS2 的灭活效果。

1.4 噬菌体 MS2 灭活动力学分析

使用一级反应动力学模型对噬菌体 MS2 的灭活过程数据进行拟合,若拟合曲线的可决系数 $R^2 > 0.95$ 表明噬菌体 MS2 的灭活符合该模型^[13],具体可由式(2)表示:

$$\ln(N_t/N_0) = -K_{\text{obs}}t \quad (2)$$

式中, N_t 为 t 时刻反应体系中噬菌体 MS2 的浓度, $\text{PFU} \cdot \text{mL}^{-1}$; N_0 为反应体系中噬菌体 MS2 的初始浓度, $\text{PFU} \cdot \text{mL}^{-1}$; K_{obs} 为表观速率常数,表示噬菌体 MS2 的灭活速率。

1.5 噬菌体 MS2 的形态观察

将 $10 \mu\text{L}$ 噬菌体悬液滴于 200 目的铜网上,静置 10 min,用滤纸吸去边缘多余的液体,滴加 $10 \mu\text{L}$ 2% 磷钨酸 (G1871,北京索莱宝科技有限公司),复染 2 min,自然风干后,用透射电镜 (TEM, JEM1230 型,日本 JEOL 公司) 在电压为 120 kV 下观察噬菌体的形态。

1.6 自由基检测

1.6.1 电子顺磁共振波谱检测

使用电子顺磁共振 (EPR) 波谱仪 (ZMXmicro-6/1 型,德国布鲁克公司) 检测体系中的自由基。加入 5,5-二甲基-1-吡咯啉- N -氧化物 (DMPO) 使其在体系中的终浓度达到 $200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。设置 EPR 主要参数为:中心磁感应强度 350 mT ,扫场宽度 20 mT ,扫场时间 87.64 s , g 因子 $2.000\,00$,微波功率 31.70 mW 。根据 DMPO 和各种自由基生成的加合物的特征峰数量和强度,鉴定体系中的自由基种类。

1.6.2 自由基淬灭实验

使用无水乙醇 (EtOH) 和叔丁醇 (TBA) 作为自由基淬灭剂,进行自由基淬灭实验。比较加入不同种类淬灭剂时噬菌体 MS2 灭活率的变化情况。根据式 (3) ~ (6) 分别计算 UV/PS 体系内各因素对噬菌体 MS2 灭活的贡献率:

$$C_1 = [(R_0 - R_1)/R_0] \times 100\% \quad (3)$$

$$C_2 = [(R_2 - R_1)/R_0] \times 100\% \quad (4)$$

$$C_3 = [(R_0 - R_2)/R_0] \times 100\% \quad (5)$$

$$C_4 = (R_1/R_0) \times 100\% \quad (6)$$

式中, C_1 为 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 和 $\cdot\text{OH}$ 对噬菌体灭活的贡献率,%; C_2 为 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 对噬菌体灭活的贡献率,%; C_3 为 $\cdot\text{OH}$ 对噬菌体灭活的贡献率,%; C_4 为 UV 对噬菌体灭活的贡献率,%; R_0 为不加入自由基淬灭剂时 UV/PS 体系对噬菌体的灭活率; R_1 为加入 EtOH

时 UV/PS 体系对噬菌体的灭活率; R_2 为加入 TBA 时 UV/PS 体系对噬菌体的灭活率。

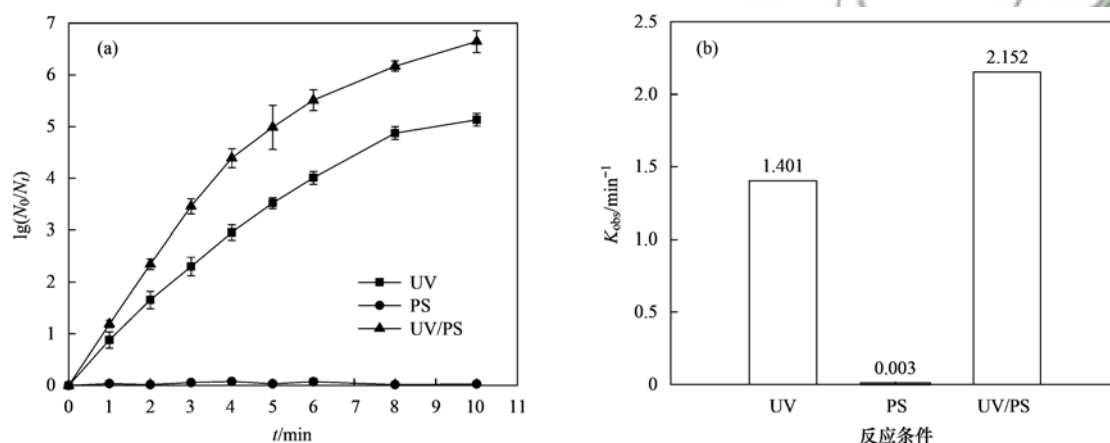
2 结果与讨论

2.1 UV、PS 和 UV/PS 对噬菌体 MS2 灭活效果的比较

本实验中的紫外辐照强度固定不变,随着紫外辐照时间的延长,紫外辐照剂量也逐渐增大,UV 和 UV/PS 对噬菌体 MS2 都表现出一定的灭活效果。通过比较图 1(a) 中的灭活率曲线可以发现,利用含 $0.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ PS 的 UV/PS 体系处理噬菌体 MS2 浓度为 $10^6 \text{ PFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的水样,在相同的紫外辐照剂量下比 UV 对噬菌体 MS2 的灭活率更高。例如,在紫外辐照强度 $160 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 下处理 4 min,即紫外辐照剂量为 $38.4 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时,对噬菌

体 MS2 的灭活率为 $2.95 \lg (R = 2.95)$,而在此辐照剂量下的 UV/PS 对噬菌体 MS2 的灭活率则高达 $4.39 \lg$,灭活率提高了 $1.44 \lg$ 。在紫外辐照剂量 $57.6 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ 以下的范围内,UV/PS 较 UV 对噬菌体灭活率的提升值随着紫外辐照剂量的增加而逐渐增大。数据拟合结果表明,UV 和 UV/PS 对噬菌体 MS2 的灭活反应均符合一级反应动力学,反应速率常数分别为 1.401 min^{-1} 和 2.152 min^{-1} [图 1(b)]。

从图 1 还可以看出,单独使用 PS 的体系对噬菌体 MS2 的灭活率极低。因此,可以排除由于 PS 的毒性导致噬菌体灭活的猜测。可以推断,UV/PS 体系对噬菌体 MS2 的有效灭活必定存在不同于 UV 消毒的新机制,很可能与 PS 在紫外辐照下发生光催化反应产生的自由基有关。



(a) 不同反应体系对噬菌体 MS2 的灭活率; (b) 不同反应体系对噬菌体 MS2 的灭活速率

图 1 不同反应体系对噬菌体 MS2 的灭活率和灭活速率对比

Fig. 1 Comparison of inactivation rate and inactivation rate rate of phage MS2 by different reaction systems

2.2 噬菌体 MS2 的灭活动力学特征

不同体系中 $\ln(N_t/N_0)$ 与灭活时间 t 的关系如图 2 所示,可以看出噬菌体 MS2 在 UV 和 UV/PS 体系中的灭活均符合一级反应动力学模型 ($R^2 > 0.95$).

2.3 UV/PS 体系中的 PS 浓度对噬菌体灭活的影响

在 UV/PS 体系中,PS 初始浓度对噬菌体 MS2 的灭活率影响明显。如图 3 所示,对于噬菌体 MS2 浓度为 $10^6 \text{ PFU} \cdot \text{mL}^{-1}$, $\text{pH} = 7$ 的水样,随 PS 初始浓度的增加,噬菌体 MS2 的灭活率和反应速率都不断升高。对于噬菌体 MS2 浓度为 $10^6 \text{ PFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的水样,当 PS 初始浓度从 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加至 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,噬菌体 MS2 的灭活率增加了 $2.71 \lg$,反应速率常数也由 1.573 min^{-1} 升高到 4.111 min^{-1} 。

以往的研究表明,增加 PS 浓度会加快体系中自由基的生成,从而提升污染物的去除率^[14,15]。但过

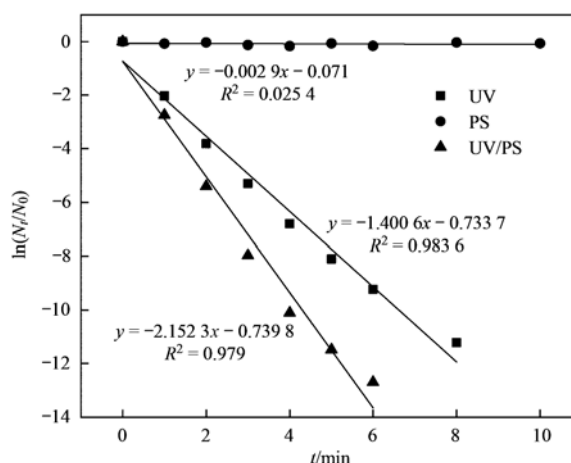
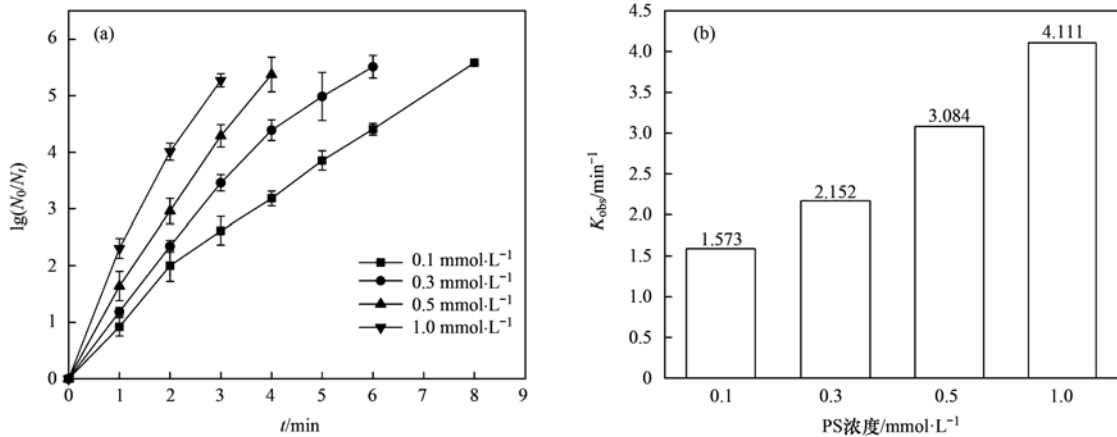


图 2 UV 和 UV/PS 体系灭活噬菌体 MS2 的一级反应拟合曲线

Fig. 2 Fitting curve of the first-order inactivation reaction of phage MS2 in UV and UV/PS systems

量的 PS 会与 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 进一步反应,从而导致体系中 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 浓度下降,抑制目标污染物的去除^[16,17]。尽管在本研究考察的 PS 初始浓度范围内未观察到对噬



(a) 不同 PS 初始浓度下的噬菌体 MS2 灭活率; (b) 不同 PS 初始浓度下的噬菌体 MS2 灭活速率

图3 UV/PS 体系中的 PS 初始浓度对噬菌体 MS2 灭活的影响

Fig. 3 Effect of initial PS concentrations in the UV/PS system on the inactivation of phage MS2

菌体灭活的抑制现象,但从应用的角度来看,不必要选择过高的 PS 浓度. 当 PS 初始浓度为 $0.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 仅需 $57.6 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的紫外辐照剂量, 就可以获得 $5.51 \lg$ 的噬菌体灭活率. 这可以满足大多数污水再生回用场景的病毒风险控制需求^[18].

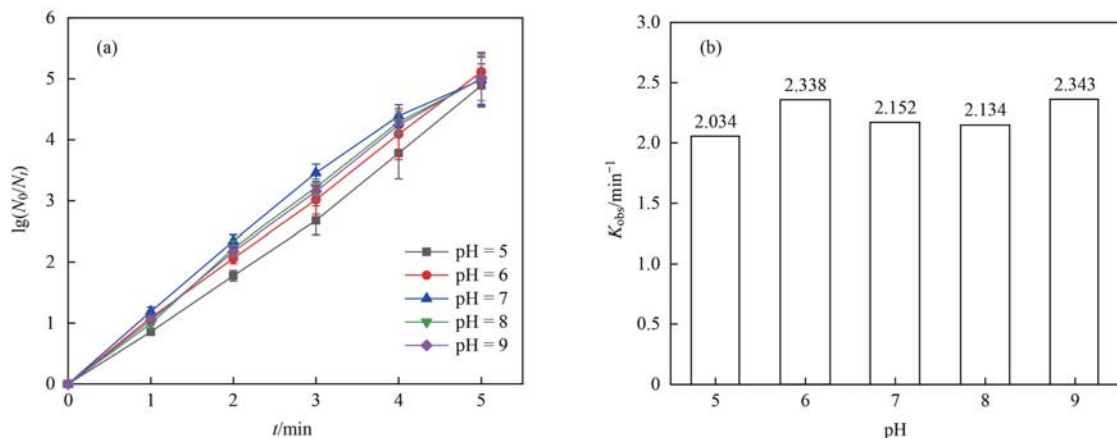
2.4 反应体系初始 pH 对 MS2 灭活的影响

在 pH 为 5~9 范围内, 反应体系的初始 pH 对噬菌体 MS2 灭活率和灭活速率的影响并不明显. 仔细观察图 4 可以发现, 中性条件 (pH=7) 下的灭活率稍高于酸性和碱性条件下的. 有研究表明, 酸性溶液中的 H^+ 会与 $\text{SO}_4 \cdot^-$ 反应生成活性较弱的 $\text{HSO}_4 \cdot$ 和 HSO_4^- , 从而降低自由基的氧化活性^[19]. 在本研究中, 可以看到 pH=5 条件下的灭活率和反应速率都是最低的. 在碱性条件下, 溶液中部分 $\text{SO}_4 \cdot^-$ 会与 OH^- 反应生成 $\cdot\text{OH}$, 溶液中 $\cdot\text{OH}$ 不断增加, $\text{SO}_4 \cdot^-$ 减少, 由于 $\cdot\text{OH}$ 的氧化还原电位 ($1.8 \sim 2.4 \text{ V}$) 低于 $\text{SO}_4 \cdot^-$ 的氧化还原电位 ($2.5 \sim 3.1 \text{ V}$), 因此碱性条件下灭活率也会下降^[20].

2.5 噬菌体 MS2 初始浓度对灭活效果的影响

在 pH=7, PS 浓度为 $0.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的条件下, 利用 UV/PS 体系对噬菌体 MS2 初始浓度分别为 3.6×10^4 、 6.6×10^5 、 5.25×10^6 和 $4.5 \times 10^7 \text{ PFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的水样进行处理. 如图 5 所示, 随着噬菌体 MS2 初始浓度的增加, 其灭活率和灭活速率都有所下降. 但除了 $4.5 \times 10^7 \text{ PFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ 这个高浓度水样之外, 其余水样在相同时间下的噬菌体 MS2 灭活率相差并不大.

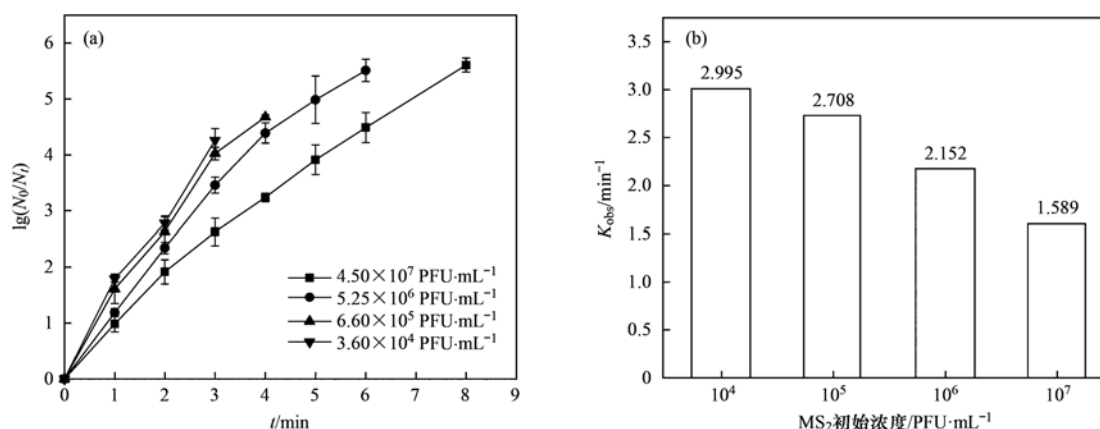
当 PS 初始浓度一定时, UV/PS 体系所产生的自由基总数量在理论上是不变的^[21]. 自由基在发挥氧化作用之后随即消亡^[22], 可能需要多个自由基的氧化反应才能引起一个噬菌体的灭活. 因此, 可以推断当噬菌体数量增加到一个临界值时, 其灭活率就会快速降低. 现有的研究表明, 城市污水中的病毒含量一般不超过 $10^7 \text{ PFU} \cdot \text{mL}^{-1}$, 二级处理出水的则更低^[23], 都远低于 $4.5 \times 10^7 \text{ PFU} \cdot \text{mL}^{-1}$. 因此, 如果致病性病毒和噬菌体在抵抗自由基氧化的能力上是近



(a) 不同 pH 条件下的噬菌体 MS2 灭活率; (b) 不同 pH 条件下的噬菌体 MS2 灭活速率

图4 UV/PS 体系的 pH 对噬菌体 MS2 灭活的影响

Fig. 4 Effect of pH of the UV/PS system on the inactivation of phage MS2



(a) 噬菌体 MS2 不同初始浓度条件下的灭活率; (b) 噬菌体 MS2 不同初始浓度条件下的灭活速率

图 5 噬菌体 MS2 初始浓度对灭活的影响

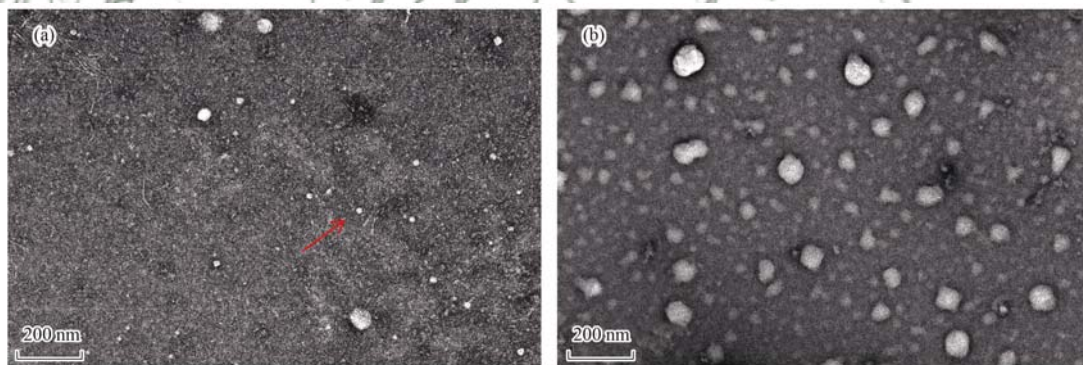
Fig. 5 Effect of initial MS2 phage concentrations on inactivation rates

似的,使用 UV/PS 处理可以保证病毒的有效去除。

2.6 UV/PS 对噬菌体 MS2 形貌的影响

利用 TEM 可以清楚地看到经 UV 处理前后的噬菌体 MS2 的微观形貌. 水样中的噬菌体 MS2 呈光滑的小球状, 直径约 26 nm, 离散分布. 样品中有个别较大的颗粒, 可能是噬菌体聚合所致[图 6(a)]. 水样在 PS 浓度为 $0.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 UV/PS 体系中处理 6 min 之后, 出现了大量不规则的大颗粒, 有些颗粒的直径甚至接近 100 nm, 颗粒的轮廓比较模糊. 光滑的小球状颗粒不复存在[图 6(b)].

由此可见, 水样经 UV/PS 处理后, 其中的噬菌体受到了严重的损伤. 噬菌体的衣壳蛋白破裂、剥离, 游离出多种蛋白质和核酸, 使体系内的物质变得复杂, 促进了颗粒团聚的发生. 大颗粒可能是多个受损噬菌体颗粒的融合体, 也可能是噬菌体与游离蛋白质的团聚体. Li 等^[6]的研究报道也表明了在有自由基存在的光催化消毒反应中, 病毒蛋白的损伤会导致蛋白质片段、蛋白质羰基等物质的大量产生. 在反应过程结束时, 这些产物可能会聚集在一起.



(a) 灭活前(红色箭头指示处为噬菌体 MS2); (b) 灭活后

图 6 噬菌体 MS2 在 UV/PS 处理前后的 TEM 图

Fig. 6 TEM images of phage MS2 before and after UV/PS treatment

2.7 UV/PS 体系中的自由基及其对噬菌体灭活的贡献

采用 EPR 波谱仪对 UV/PS 体系中的自由基种类进行检测. 加入的 5,5-二甲基-1-吡咯啉-N-氧化物(DMPO)可以捕获体系中的自由基, 并与其反应生成具有特征峰的加合物^[24]. 从图 7 可以看出, 在 UV/PS 体系中存在两组特征峰, 一组特征峰强度为 1:2:2:1, 代表由 DMPO 和 $\cdot\text{OH}$ 生成的加合物; 另一组为 1:1:1:1:1:1, 这是 DMPO 与 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 生成的加合物的特征峰^[25]. 紫外线活化过硫酸钠生成

$\text{SO}_4^{\cdot-}$, 其又与溶液中的 H_2O 反应生成 $\cdot\text{OH}$ ^[26], 因此在 UV/PS 体系中存在 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 和 $\cdot\text{OH}$ 这两种自由基.

分别以无水乙醇(EtOH)和叔丁醇(TBA)作为自由基淬灭剂进行自由基淬灭实验, 来确定 UV/PS 体系中 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 和 $\cdot\text{OH}$ 对噬菌体 MS2 灭活发挥的作用. EtOH 与 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 和 $\cdot\text{OH}$ 的反应速率均较高, 分别为 $1.2 \times 10^9 \sim 2.8 \times 10^9 \text{ L} \cdot (\text{mol} \cdot \text{s})^{-1}$ 和 $1.6 \times 10^7 \sim 7.7 \times 10^7 \text{ L} \cdot (\text{mol} \cdot \text{s})^{-1}$ ^[27]; 叔丁醇与 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 和 $\cdot\text{OH}$ 的反应速率分别为 $4.0 \times 10^5 \sim 8.1 \times 10^5 \text{ L} \cdot (\text{mol} \cdot \text{s})^{-1}$ 和

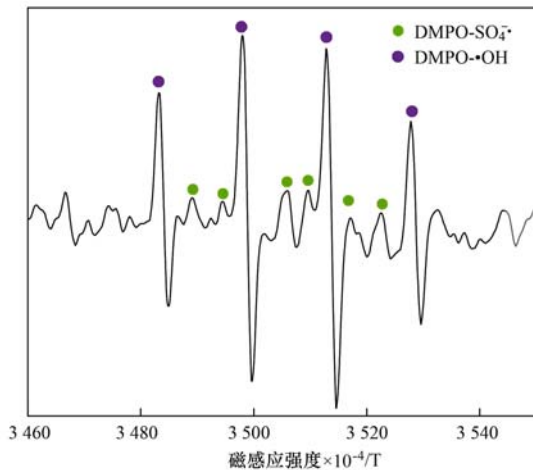


图7 UV/PS体系中的自由基EPR波谱

Fig. 7 EPR spectra of free radicals in the UV/PS system

$3.8 \times 10^9 \sim 7.6 \times 10^9 \text{ L} \cdot (\text{mol} \cdot \text{s})^{-1}$ [28]. 因此, 可以认为 EtOH 对 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 和 $\cdot\text{OH}$ 都具有强淬灭作用, 而叔丁醇仅对 $\cdot\text{OH}$ 有强淬灭作用.

在 UV/PS 体系中加入 EtOH 后, $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 和 $\cdot\text{OH}$ 都被淬灭, 此时噬菌体 MS2 的灭活完全是 UV 的作用, 与未加入自由基淬灭剂的体系相比, 灭活率明显下降 (图 8). 加入 TBA 的 UV/PS 体系, $\cdot\text{OH}$ 被淬灭, 此时噬菌体 MS2 的灭活率比加入 EtOH 的稍高. 这表明 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 和 $\cdot\text{OH}$ 对噬菌体的灭活都有贡献, 但后者的作用更大. 由于较高浓度的淬灭剂能够更快、更充分地捕捉自由基, 因此当添加的自由基淬灭剂浓度为 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时比淬灭剂浓度 $30 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时的灭活率降幅更大.

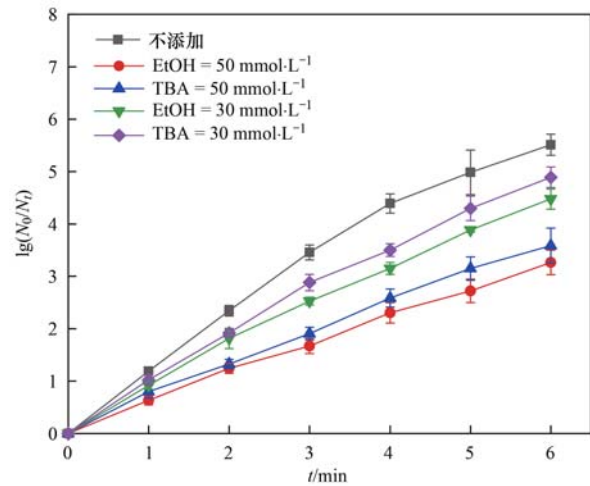
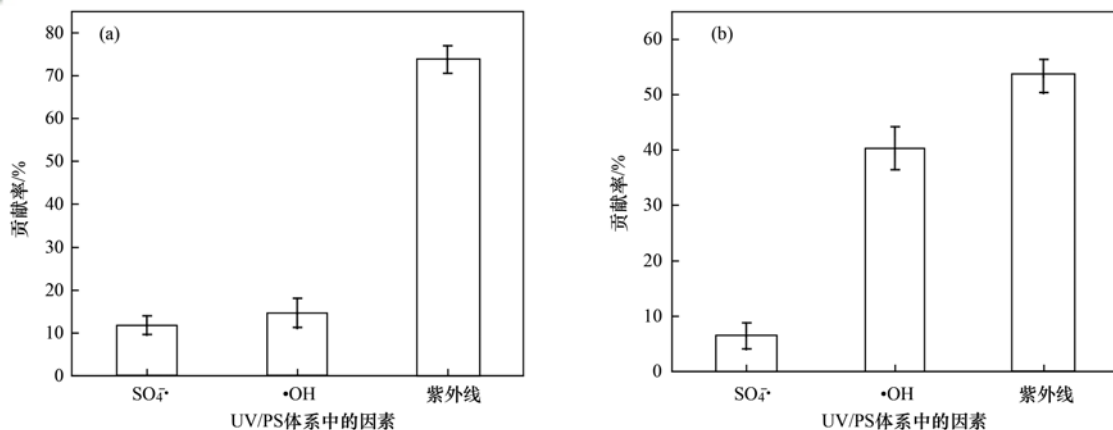


图8 自由基淬灭剂对 UV/PS 体系灭活噬菌体 MS2 的影响

Fig. 8 Effect of free radical quenching agents on the inactivation of phage MS2 in the UV/PS system

通过计算, UV/PS 体系中各因素对噬菌体 MS2 灭活的贡献率见图 9. 当添加的自由基淬灭剂浓度为 $30 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 和 $\cdot\text{OH}$ 对 UV/PS 灭活噬菌体 MS2 的贡献率分别为 11.69% 和 14.57%, 其余的 73.74% 则为 UV 贡献. 当添加的自由基淬灭剂浓度为 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, UV/PS 体系中 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 、 $\cdot\text{OH}$ 和 UV 对噬菌体 MS2 灭活的贡献率则分别为 6.37%、40.26% 和 53.37%. 总体来看, UV/PS 体系中存在多种对噬菌体 MS2 有灭活作用的因素. 除 UV 之外, 两种自由基也是噬菌体灭活的重要因素, 贡献率大约有 26%~47%. 其中, $\cdot\text{OH}$ 比 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 对噬菌体 MS2 的灭活贡献更大.



(a) 实验条件: EtOH $30 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, TBA $30 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$; (b) 实验条件: EtOH $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, TBA $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$

图9 UV/PS 体系中各因素对噬菌体 MS2 灭活的贡献率

Fig. 9 Contributions of factors to the inactivation of phage MS2 in the UV/PS system

3 结论

(1) UV/PS 体系可以在低剂量紫外辐照条件下高效灭活大肠杆菌噬菌体 MS2, 其灭活过程符合一级反应动力学模型. 增加体系中的 PS 初始浓度能明

显提高对噬菌体的灭活率和灭活速率. 在 pH 6~9, 噬菌体 MS2 初始浓度 $10^4 \sim 10^7 \text{ PFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ 范围内, UV/PS 体系对噬菌体 MS2 的灭活率都比较稳定.

(2) UV/PS 处理可导致噬菌体的衣壳破损, 游离出多种蛋白质和核酸. 受损的噬菌体颗粒之间, 以

及噬菌体与游离蛋白质之间易发生团聚。

(3) UV/PS 体系中存在 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 和 $\cdot\text{OH}$ 。除 UV 之外,这两种自由基也是噬菌体 MS2 灭活的重要因素。 $\cdot\text{OH}$ 比 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 对噬菌体 MS2 灭活的贡献更大。

参考文献:

- [1] Hewitt J, Leonard M, Greening G E, *et al.* Influence of wastewater treatment process and the population size on human virus profiles in wastewater [J]. *Water Research*, 2011, **45** (18): 6267-6276.
- [2] Yang Q, Rivallier P, Zhu S L, *et al.* Detection of multiple viruses potentially infecting humans in sewage water from Xinjiang Uygur Autonomous Region, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **754**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142322.
- [3] Canh V D, Torii S, Furumai H, *et al.* Application of capsid integrity(RT-)qPCR to assessing occurrence of intact viruses in surface water and tap water in Japan [J]. *Water Research*, 2021, **189**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116674.
- [4] Stokdyk J P, Firnstahl A D, Walsh J F, *et al.* Viral, bacterial, and protozoan pathogens and fecal markers in wells supplying groundwater to public water systems in Minnesota, USA [J]. *Water Research*, 2020, **178**, doi: 10.1016/j.watres.2020.115814.
- [5] Bailey E S, Casanova L M, Simmons III O D, *et al.* Tertiary treatment and dual disinfection to improve microbial quality of reclaimed water for potable and non-potable reuse: A case study of facilities in North Carolina [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **630**: 379-388.
- [6] Li Y, Zhang G, Shuai D M, *et al.* Visible-light-driven photocatalytic inactivation of MS2 by metal-free g-C₃N₄: virucidal performance and mechanism [J]. *Water Research*, 2016, **106**: 249-258.
- [7] 徐丽梅, 张崇森, 王晓昌, 等. 紫外线和次氯酸钠对 *Escherichia coli* 和 *poliovirus* 的消毒作用 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(5): 1928-1935.
- Xu L M, Zhang C M, Wang X C, *et al.* Disinfection action of ultraviolet radiation and chlorination on *Escherichia coli* and *poliovirus* [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(5): 1928-1935.
- [8] Wang Z P, Chen Y Q, Xie P C, *et al.* Removal of *Microcystis aeruginosa* by UV-activated persulfate: Performance and characteristics [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, **300**: 245-253.
- [9] Zhang Y Y, Li L Y, Pan Z H, *et al.* Degradation of sulfamethoxazole by UV/persulfate in different water samples: influential factors, transformation products and toxicity [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, **379**, doi: 10.1016/j.cej.2019.122354.
- [10] Fu Y Y, Gao X S, Geng J J, *et al.* Degradation of three nonsteroidal anti-inflammatory drugs by UV/Persulfate: Degradation mechanisms, efficiency in effluents disposal [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, **356**: 1032-1041.
- [11] 蒋梦迪, 张清越, 季跃飞, 等. 热活化过硫酸盐降解三氯生 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1661-1667.
- Jiang M D, Zhang Q Y, Ji Y F, *et al.* Degradation of triclosan by heat activated persulfate oxidation [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1661-1667.
- [12] Sun P Z, Tyree C, Huang C H. Inactivation of *Escherichia coli*, bacteriophage MS2, and *Bacillus* spores under UV/H₂O₂ and UV/peroxydisulfate advanced disinfection conditions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(8): 4448-4458.
- [13] Xu L, Bai X, Guo L K, *et al.* Facial fabrication of carbon quantum dots (CDs)-modified N-TiO₂-x nanocomposite for the efficient photoreduction of Cr(VI) under visible light [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, **357**: 473-486.
- [14] 余韵, 陆金鑫, 吕贞, 等. 紫外活化过硫酸盐降解水中三氯蔗糖动力学和机制 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4626-4635.
- Yu Y, Lu J X, Lü Z, *et al.* Kinetics and mechanism of sucralose degradation in water using UV-activated persulfate process [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4626-4635.
- [15] Wang J L, Wang S Z. Activation of persulfate (PS) and peroxymonosulfate (PMS) and application for the degradation of emerging contaminants [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, **334**: 1502-1517.
- [16] Liu Y Q, He X X, Fu Y S, *et al.* Kinetics and mechanism investigation on the destruction of oxytetracycline by UV-254 nm activation of persulfate [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, **305**: 229-239.
- [17] Hori H, Yamamoto A, Hayakawa E, *et al.* Efficient decomposition of environmentally persistent perfluorocarboxylic acids by use of persulfate as a photochemical oxidant [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(7): 2383-2388.
- [18] Zhang C M, Wang X C. Distribution of enteric pathogens in wastewater secondary effluent and safety analysis for urban water reuse [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2014, **20**(3): 797-806.
- [19] 朱思瑞, 高乃云, 鲁仙, 等. 热激活过硫酸盐氧化降解水中双酚 A [J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(1): 188-194.
- Zhu S R, Gao N Y, Lu X, *et al.* Degradation of bisphenol A in aqueous solution by thermally activated sulfate oxidation [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(1): 188-194.
- [20] 高乃云, 胡栩豪, 邓靖, 等. 紫外激活过硫酸盐降解水中卡马西平研究 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2013, **41**(12): 117-122.
- Gao N Y, Hu X H, Deng J, *et al.* Study on UV-activated persulfate oxidation of carbamazepine in water [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2013, **41**(12): 117-122.
- [21] 马萌, 许路, 金鑫, 等. 太阳能热活化过硫酸盐降解染料罗丹明 B 的效能 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1451-1460.
- Ma M, Xu L, Jin X, *et al.* Degradation of dye rhodamine B by solar thermally activated persulfate [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1451-1460.
- [22] Zou L X, Wang Y, Huang C, *et al.* Meta-cresol degradation by persulfate through UV/O₃ synergistic activation: Contribution of free radicals and degradation pathway [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **754**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142219.
- [23] Carvajal G, Roser D J, Sisson S A, *et al.* Bayesian belief network modelling of chlorine disinfection for human pathogenic viruses in municipal wastewater [J]. *Water Research*, 2017, **109**: 144-154.
- [24] Dai Z, Qin F, Zhao H P, *et al.* Crystal defect engineering of aurivillius Bi₂MoO₆ by Ce doping for increased reactive species production in photocatalysis [J]. *ACS Catalysis*, 2016, **6**(5): 3180-3192.
- [25] Wang L L, Lan X, Peng W Y, *et al.* Uncertainty and

- misinterpretation over identification, quantification and transformation of reactive species generated in catalytic oxidation processes: a review[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **408**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124436.
- [26] Boczkaj G, Fernandes A. Wastewater treatment by means of advanced oxidation processes at basic pH conditions: a review [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, **320**: 608-633.
- [27] Xu L, Fu B R, Sun Y, *et al.* Degradation of organic pollutants by Fe/N co-doped biochar via peroxymonosulfate activation: synthesis, performance, mechanism and its potential for practical application[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, **400**, doi: 10.1016/j.cej.2020.125870.
- [28] Wang Y X, Ao Z M, Sun H Q, *et al.* Activation of peroxymonosulfate by carbonaceous oxygen groups: experimental and density functional theory calculations[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2016, **198**: 295-302.

欢迎订阅 2022 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如工程索引 Ei Compendex;医学索引 MEDLINE; Scopus; 化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA); Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA): Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS);Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

国内统一连续出版物号:CN 11-1895/X

国际标准连续出版物号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205

国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Continuous PM _{2.5} Composition Measurements for Source Apportionment During Air Pollution Events	CAI Fan-tao, SHANG Yue, DAI Wei, <i>et al.</i> (4575)
Orographic Influences on the Spatial Distribution of PM _{2.5} on the Fen-Wei Plain	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, SUN Cong-jian, <i>et al.</i> (4582)
Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Under Winter Haze Conditions in Central China: A Case Study of Huanggang, Hubei Province	LI Xing-yu, MAO Yao, CHEN Zhan-le, <i>et al.</i> (4593)
Concentration and Reactivity of Carbonyl Compounds in the Atmosphere of North China	HUANG Yu, CHEN Xi, WANG Ying-hong, <i>et al.</i> (4602)
Characteristics of O ₃ Pollution and Key Precursors in Chengdu During Spring	HAN Li, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (4611)
O ₃ Source Characteristics of an Industrial Area in the Yangtze River Delta Based on Boundary Observations	HUANG Qing, HUANG Yin-zhi, ZHANG Shan, <i>et al.</i> (4621)
Characteristics and Source of VOCs During O ₃ Pollution Between August to September, Langfang Development Zones	ZHANG Jing-qiao, WANG Hong-liang, FANG Xiao-yun, <i>et al.</i> (4632)
Coating-derived VOCs Emission Characteristics and Environmental Impacts from the Furniture Industry in Guangdong Province	ZENG Chun-ling, SHAO Xia, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (4641)
Response of Air Quality to COVID-19 Lockdown in Xiamen Bay	XU Chao, WU Shui-ping, LIU Yi-jing, <i>et al.</i> (4650)
Similarities and Differences of Valley Winds in the Beijing Plain and Yanqing Areas and Its Impact on Pollution	WU Jin, LI Chen, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4660)
Characteristics of Atmospheric Particulate Matter Pollution and the Unique Wind and Underlying Surface Impact in the Twain-Hu Basin in Winter	ZHU Yan, ZHAO Tian-liang, BAI Yong-qing, <i>et al.</i> (4669)
Conversion Characterizations of Sulfate Ion and Nitrate Ion in Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	YANG Liu, HE Qing, SHENG Zhong-yi (4678)
Water Chemical Characteristics and Influence of Exogenous Acids in the Yangtze River Basin	WANG Qi, YU Shi, JIANG Ping-ping, <i>et al.</i> (4687)
Effects of Land Use on Nutrient Concentrations in the Inflow River of Lake Taihu, China	LIAN Xin-qiao, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4698)
Diversity of Zooplankton and Niche Characteristics of Keystone Species in the Weihe River Based on eDNA	LIANG Dong, XIA Jun, SONG Jin-xi, <i>et al.</i> (4708)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical and Personal Care Products in the Aquatic Environment of Sanya City, China	REN Bing-nan, GENG Jing (4717)
Screening of Priority Pollutants and Risk Assessment for Surface Water from Shengjin Lake	GONG Xiong-hu, DING Qi-qi, JIN Miao, <i>et al.</i> (4727)
Long-term Changes and Drivers of Ecological Security in Shahe Reservoir, China	YANG Wen-bin, DUAN Wen-xiu, CUI Yang, <i>et al.</i> (4739)
Seasonal Variation and Influencing Factor Analysis of Antibiotic Resistance Genes in Water Supply Reservoirs of Central China	ZHANG Kai, XIN Rui, LI Kuang-jia, <i>et al.</i> (4753)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of NO ₃ -Type Groundwater in the Rapidly Urbanizing Pearl River Delta	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (4761)
Spatial Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water in the Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i> (4772)
Identification of Dredging Depths Based on Sediment Vertical Distribution Profiles of Total Nitrogen and Total Phosphorus and Their Adsorption-desorption Equilibria	ZHOU Ya-ting, CHEN Xing-hong, LI Li-qing, <i>et al.</i> (4781)
Role of Borate and Phosphate Buffers in the Degradation of Organic Compounds in a PMS/Co ²⁺ System: Influencing Factors and Mechanisms	WAN Qi-qi, CHEN Zhu-hao, CAO Rui-hua, <i>et al.</i> (4789)
Degradation 2,2',4,4'-Tetrabromodiphenyl Ether by Activated Peroxymonosulfate Using Magnetic Biochar Supported α -MnO ₂	LI Xin, YIN Hua, LUO Hao-yu, <i>et al.</i> (4798)
Characteristics and Mechanisms of Bacteriophage MS2 Inactivation in Water by UV Activated Sodium Persulfate	ZHANG Chong-miao, YANG Hao-ming, WANG Zhen (4807)
Adsorption Characteristics of Phosphate on Cerium Modified Water Hyacinth Biochar	WANG Guang-ze, ZENG Wei, LI Shuai-shuai (4815)
Removal Efficiency and Mechanism of Ammonia Nitrogen in a Low Temperature Groundwater Purification Process	LI Dong, LIU Meng-hao, ZHANG Rui-miao, <i>et al.</i> (4826)
Speciation and Ecological Risk Assessment of Heavy Metal(loid)s in the Municipal Sewage Sludge of China	GENG Yuan-meng, ZHANG Chuan-bing, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (4834)
Meta-analysis of Microbial Communities in the Activated Sludge of Wastewater Treatment Plants Under Different Climate Types	YANG Si-hang, QIN Ze-sheng, LIANG Man-chun (4844)
Partial Nitrification and Anaerobic Ammonia Oxidation Synergistic Denitrification to Remove Nitrogen and Carbon from Domestic Sewage	QIN Yan-rong, YUAN Zhong-ling, ZHANG Ming, <i>et al.</i> (4853)
Cultivation and Performance Analysis of Simultaneous Partial Nitrification, ANAMMOX, and Denitrification Granular Sludge	ZHOU Feng, LIU Yong-di, LI Wei (4864)
Application of Various Methods to Extract Microplastic from Typical Soils in China	ZHAO Xiao-li, LIU Zi-han, CONG Chen-yu, <i>et al.</i> (4872)
Evaluation and Sources of Heavy Metal Pollution in the Surface Soil of the Qaidam Basin	CHEN Liang, ZHANG Xi-ying, TANG Qi-liang, <i>et al.</i> (4880)
Content and Ecological Risks of Heavy Metals in Soil with Different Land Uses in a Rapidly Urbanizing Area	LI Meng-ting, SHEN Cheng, WU Jian, <i>et al.</i> (4889)
Selenium Geochemical Characteristics and Influencing Factors of Paddy Fields in Du'an County, Guangxi	LIU Fei, YANG Ke, XU Ren-ting, <i>et al.</i> (4897)
Carbonized Apple Branches Decrease the Accumulation and Damage of Cadmium on Apple Rootstock by Reducing DTPA-Cd in Soil	DENG Bo, XUN Mi, ZHANG Wei-wei, <i>et al.</i> (4908)
Accumulation and Health Risk of Heavy Metals in Cereals, Vegetables, and Fruits of Intensive Plantations in Hainan Province	YANG Jian-zhou, WANG Zhen-liang, GAO Jian-weng, <i>et al.</i> (4916)
Correlation Analysis among Environmental Antibiotic Resistance Genes Abundance, Antibiotics Concentrations, and Heavy Metals Concentrations Based on Web of Science Searches	MIAO Sun, CHEN Lei, ZUO Jian-e (4925)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Farmland Soil in Yinchuan	ZHANG Xiao-hong, TAO Hong, WANG Ya-juan, <i>et al.</i> (4933)
Effect of Manure from Different Sources on the Leaching of Antibiotics in Soil	LI Bin-xu, ZHU Chang-xiong, SONG Ting-ting, <i>et al.</i> (4942)
Analysis of the Traits of Nitrogen Metabolism Pathways for Several Forest Soils in Eastern China	LÜ Xue-li, ZHAO Yong-peng, LIN Qing-huo, <i>et al.</i> (4951)
Denitrification Rates and <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria Community Structure Characteristics of Bulk and Rhizosphere Soil in Spring and Summer in the Alpine Wetlands of the Qinghai-Tibet Plateau	LI Yu-qian, MA Jun-wei, GAO Chao, <i>et al.</i> (4959)
Microbial Community Structure of Soil Methanogens and Methanotrophs During Degradation and Restoration of Reed Wetlands in the Songnen Plain	WANG Qiu-ying, WANG Na, LIU Ying, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Fluvio-aquic Soil Under Different Rotation Fallow	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, DAI Hong-cui, <i>et al.</i> (4977)
Response of Photosynthetic Bacterial Community to Cadmium Contamination in Paddy Soil	LUO Lu-yun, JIN De-cai, WANG Dian-dong, <i>et al.</i> (4988)
Community Distribution of the Rhizospheric and Endophytic Bacteria of <i>Phragmites australis</i> and Their Limiting Factors in Iron Tailings	CAO Man-man, WANG Fei, ZHOU Bei-hai, <i>et al.</i> (4998)
Effects of Combination of Organic and Inorganic Nitrogen on Nitrification and Denitrification in Two Salinized Soils	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, ZHANG Wen-cong, <i>et al.</i> (5010)
Response of Yield, CH ₄ , and N ₂ O Emissions from Paddy Fields to Long-term Elevated CO ₂ Concentrations	YU Hai-yang, SONG Kai-fu, HUANG Qiong, <i>et al.</i> (5021)
Effects of Feedstock Material and Pyrolysis Temperature on Dissolved Organic Matter in Biochars	YAN Dai-hong, MA Ya-pei, SONG Kai-yue, <i>et al.</i> (5030)
Spatiotemporal Variations in Atmospheric Urban Heat Island Effects and Their Driving Factors in 84 Major Chinese Cities	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei (5037)
Research Progress in the Odorants and Their Emissions from Indoor Building Decoration Materials	ZHANG Wan-zhong, ZHANG Peng-yi (5046)