

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第6期

Vol.34 No.6

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2008 ~ 2010 年北京城区大气 BTEX 的浓度水平及其 O ₃ 生成潜势	曹函玉, 潘月鹏, 王辉, 谭吉华, 王跃思 (2065)
利用 SPAMS 研究上海秋季气溶胶污染过程中颗粒物的老化与混合状态	牟莹莹, 楼晟荣, 陈长虹, 周敏, 王红丽, 周振, 乔利平, 黄成, 李梅, 李莉, 王倩, 黄海英, 邹兰军 (2071)
沈阳市降水化学成分及来源分析	张林静, 张秀英, 江洪, 张清新 (2081)
秦皇岛大气污染物浓度变化特征	刘鲁宁, 申雨璇, 辛金元, 吉东生, 王跃思 (2089)
笼养鸡生长过程 NH ₃ 、N ₂ O、CH ₄ 和 CO ₂ 的排放	周忠凯, 朱志平, 董红敏, 陈永杏, 尚斌 (2098)
碳化硅协同分子筛负载型催化微波辅助催化氧化甲苯性能	王晓晖, 卜龙利, 刘海楠, 张浩, 孙剑宇, 杨力, 蔡力栋 (2107)
生物滴滤塔净化多组分废气的研究	张定丰, 房俊逸, 叶杰旭, 邱松凯, 钱东升, 戴启洲, 陈东之 (2116)
在氧化和还原氛围下脉冲电晕法降解二硫化碳废气	金圣, 黄立维, 李国平 (2121)
模拟大气 CO ₂ 水平升高对春季太湖浮游植物生理特性的影响	赵旭辉, 汤龙升, 史小丽, 杨州, 孔繁翔 (2126)
一种确定湖泊水质基准参照状态浓度的新方法	华祖林, 汪靛 (2134)
HSPF 径流模拟参数敏感性分析与模型适用性研究	李燕, 李兆富, 席庆 (2139)
基于非点源污染的水质监测方案研究	吴喜军, 李怀恩, 李家科, 李强坤, 董雯 (2146)
不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究	陈玲, 刘德富, 宋林旭, 崔玉洁, 张革 (2151)
春季东海赤潮发生前后营养盐及溶解氧的平面分布特征	李鸿妹, 石晓勇, 陈鹏, 张传松 (2159)
三峡库区大宁河枯水期藻细胞的时空分布	张永生, 郑丙辉, 王坤, 姜霞, 郑浩 (2166)
湖泊沉积物溶解性有机氮组分的藻类可利用性	冯伟莹, 张生, 焦立新, 王圣瑞, 李畅游, 崔凤丽, 付绪金, 甄志磊 (2176)
刚毛藻分解对上覆水磷含量及赋存形态的影响	侯金枝, 魏权, 高丽, 孙卫明 (2184)
反复扰动下磷在沉积物和悬浮物以及上覆水间的交换	李大鹏, 王晶, 黄勇 (2191)
三峡库区主要支流表层沉积物多溴联苯醚的分布特征	李昆, 赵高峰, 周怀东, 刘晓茹, 余丽琴, 文武, 张盼伟 (2198)
UV 和 H ₂ O ₂ 联合消毒灭活饮用水中大肠杆菌研究	张一清, 周玲玲, 张永吉 (2205)
臭氧降解水中邻苯二甲酸二甲酯的动力学及影响因素	于丽, 张培龙, 侯甲才, 庞立飞, 李越, 贾寿华 (2210)
硝酸根对水体中甲基汞光化学降解的影响	毛雯, 孙荣国, 王定勇, 马明, 张成 (2218)
快雌醇氯化反应的动力学和机制研究	王斌楠, 刘国强, 孔德洋, 陆勇鹤 (2225)
金属离子对 δ-MnO ₂ 去除对叔辛基酚抑制作用的研究	李非里, 牟华倩 (2232)
核-壳表面磁性印迹聚合物的制备及其对水中双酚 A 的特异性去除	刘建明, 李红, 熊振湖 (2240)
有机蒙脱石负载纳米铁去除溶液中四溴双酚 A 的研究	闫梦玥, 庞志华, 李小明, 退建宇, 罗隽 (2249)
纳滤预处理测定景观水体中溶解性有机氮质量浓度及其分布特征	于红蕾, 霍守亮, 杨周生, 席北斗, 咎逢宇, 张靖天 (2256)
改性水凝胶的制备及其对 Pb ²⁺ 、Cd ²⁺ 吸附性能研究	吴宁梅, 李正魁 (2263)
直接大红 4BE 的磷钨酸均相光催化还原脱色	魏红, 李克斌, 李娟, 陈经涛, 张涛 (2271)
基于微气泡曝气的生物膜反应器处理废水研究	张磊, 刘平, 马锦, 张静, 张明, 吴根 (2277)
Fenton 法处理竹制品废水生化出水出水的研究	郭庆稳, 张敏, 王炜, 杨治中, 吴东雷 (2283)
二价铁离子对 UASB 反应器厌氧发酵产氢效能的影响	李永峰, 王艺璇, 程国玲, 刘春妍 (2290)
进水底物浓度对蔗糖废水产酸合成 PHA 影响研究	陈志强, 邓毅, 黄龙, 温沁雪, 郭子瑞 (2295)
接种好氧颗粒污泥快速启动硝化工艺的过程研究	刘文如, 沈耀良, 丁玲玲, 丁敏 (2302)
聚磷污泥去除高浓度铅的影响因素研究	杨敏, 卢龙, 冯涌, 方超, 李雄清 (2309)
体积溶氧传递系数在好氧颗粒污泥系统中的变化特性初步分析	李志华, 范长青, 王晓昌 (2314)
我国淡水水体中双酚 A (BPA) 的生态风险评价	汪浩, 冯承莲, 郭广慧, 张瑞卿, 刘跃丹, 吴丰昌 (2319)
麦穗鱼物种敏感性评价	王晓南, 刘征涛, 闫振广, 张聪, 何丽, 孟双双 (2329)
不同评估方法得出的五氯酚的 PNEC 值的比较研究	雷炳莉, 文育, 王艺陪, 康佳, 刘倩 (2335)
桂林市交警头发 Hg、Pb 含量及分布研究	钱建平, 张力, 李成超, 黄栋 (2344)
直流电场处理后降线藻趋光性对 Cu ²⁺ 和 Hg ²⁺ 的响应	王飞祥, 袁玲, 黄建国 (2350)
UV-B 辐射对青冈凋落叶化学组成和分解的影响	宋新章, 卜涛, 张水奎, 江洪, 王志坤, 赵明水, 刘永军 (2355)
7 种树木的叶片微形态与空气悬浮颗粒吸附及重金属累积特征	刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 杨聘聘 (2361)
溶解氧对碳氮硫共脱除工艺中微生物群落影响解析	于皓, 陈川, 张莉, 王爱杰 (2368)
不同耕地利用方式下土壤微生物活性及群落结构特性分析: 基于 PLFA 和 MicroResp TM 方法	陈晓娟, 吴小红, 刘守龙, 袁红朝, 李苗苗, 朱捍华, 葛体达, 童成立, 吴金水 (2375)
典型滨海湿地干湿交替过程氮素动态的模拟研究	韩建刚, 曹雪 (2383)
三峡库区巫山建坪地区土壤镉等重金属分布特征及来源研究	刘意章, 肖唐付, 宁增平, 贾彦龙, 黎华军, 杨菲, 姜涛, 孙昊 (2390)
北京市不同区位耕作土壤中重金属总量与形态分布特征	陈志凡, 赵焯, 郭廷忠, 王永峰, 田青 (2399)
季节变化对贵阳市不同功能区地表灰土重金属的影响	李晓燕 (2407)
东营市孤岛地区土壤中类二噁英类 PCBs 的污染特征	王登阁, 崔兆杰, 傅晓文, 殷永泉, 许宏宇 (2416)
模拟氮沉降对森林土壤有机物淋溶的影响	段雷, 马萧萧, 余德祥, 谭炳全 (2422)
甲基 β 环糊精对污染场地土壤中多环芳烃的异位增效洗脱修复研究	孙明明, 滕应, 骆永明, 李振高, 贾仲君, 张满云 (2428)
胶质芽孢杆菌对印度芥菜根际土壤镉含量及土壤酶活性影响	杨榕, 李博文, 刘微 (2436)
长期施用粪肥蔬菜基地蔬菜中典型抗生素的污染特征	吴小莲, 向垒, 莫测辉, 姜元能, 严青云, 李彦文, 黄献培, 苏青云, 王纪阳 (2442)
有机废弃物堆肥培肥土壤的氮矿化特性研究	张旭, 席北斗, 赵越, 魏自民, 李洋, 赵昕宇 (2448)
北京市生活垃圾转运站耗能和排污特征及其影响因素分析	王昭, 李振山, 冯亚斌, 焦安英, 薛安 (2456)
氨对垃圾焚烧飞灰浸出特性的影响及地球化学模拟	官贞珍, 陈德珍, Thomas Astrup (2464)
焚烧飞灰预处理工艺及其无机氯盐的行为研究	朱芬芬, 高冈昌辉, 大下和傲, 姜惠民, 北岛義典 (2473)
富含中孔与酸性基团的生物炭的制备与吸附性能	李坤彬, 李辉, 郑正, 张雨轩 (2479)
生物炭技术缓解我国温室效应潜力初步评估	姜志翔, 郑浩, 李锋民, 王震宇 (2486)
基于物质流分析的钾素流动与循环研究	白桦, 曾思育, 董欣, 陈吉宁 (2493)
《环境科学》征订启事 (2115) 《环境科学》征稿简则 (2224) 信息 (2217, 2289, 2349, 2398) 专辑征稿通知 (2478)	

UV 和 H₂O₂ 联合消毒灭活饮用水中大肠杆菌研究

张一清¹, 周玲玲², 张永吉^{1*}

(1. 长江水环境教育部重点实验室(同济大学), 上海 200092; 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: 以大肠杆菌为研究对象, 对单独紫外线(UV)、H₂O₂及两者不同组合方式的灭活效果进行了分析. 结果表明, 单独H₂O₂对大肠杆菌基本无灭活效果, 加入浓度为 20 mg·L⁻¹的H₂O₂接触时间为 30 min 时, 灭活率仅为 0.02 个对数级; 单独 UV 工艺可在一定程度上灭活大肠杆菌, 紫外线剂量为 10 mJ·cm⁻²时, 灭活率可达到 4.51 个对数级. 紫外线和H₂O₂联合消毒在一定程度上提高了消毒效果, 且不同的组合方式对灭活效果有很大的影响. 先 UV 后H₂O₂消毒效果优于先H₂O₂后 UV, 当紫外线剂量为 5 mJ·cm⁻²时, 加入H₂O₂分别反应 2.5、5、10、20 min 后, 两者的灭活率分别较单独 UV 消毒增加 0.09、0.35、0.38、0.68 和 0.01、0.07、0.14、0.53 个对数级. 而 UV 与H₂O₂同时消毒效果优于 UV 与H₂O₂顺序消毒, 当紫外线剂量为 5 mJ·cm⁻²时, 加入H₂O₂反应 20 min 后, 灭活率较 UV-H₂O₂和H₂O₂-UV 工艺分别增加了 0.43 和 0.58 个对数级. 随着紫外线强度的增加, 大肠杆菌的灭活效果不断提高.

关键词: 紫外线; H₂O₂; 消毒; 大肠杆菌; 灭活效果

中图分类号: TU991.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)06-2205-05

Study on UV and H₂O₂ Combined Inactivation of *E. coli* in Drinking Water

ZHANG Yi-qing¹, ZHOU Ling-ling², ZHANG Yong-ji¹

(1. Key Laboratory of Yangtze River Water Environment, Ministry of Education(Tongji University), Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The inactivation effect of *E. coli* with both UV irradiation and hydrogen peroxide disinfection individually and in different combination modes was investigated. The results showed that hydrogen peroxide alone caused hardly any inactivation of *E. coli*. Only 0.02 lg inactivation was achieved by hydrogen peroxide with concentration of 20 mg·L⁻¹ and contact time of 30 min. UV irradiation was able to inactivate *E. coli* to a certain extent. The inactivation reached 4.51 lg at a UV dose of 10 mJ·cm⁻². The combination of UV and H₂O₂ could significantly improve the inactivation effect and the different combination modes affected the inactivation effect. The inactivation effect of UV-H₂O₂ was better than that of H₂O₂-UV. The inactivation was increased by 0.09, 0.35, 0.38, 0.68 lg and 0.01, 0.07, 0.14, 0.53 lg when compared to the treatment with solely UV irradiation, respectively, at UV dose of 5 mJ·cm⁻² with hydrogen peroxide at contact time of 2.5, 5, 10, 20 minutes. UV/H₂O₂ achieved better results than sequential disinfection. The inactivation was enhanced by 0.43 lg and 0.58 lg when compared to UV-H₂O₂ and H₂O₂-UV, respectively, at UV dose of 5 mJ·cm⁻² with hydrogen peroxide at contact time of 20 minutes. The inactivation of *E. coli* increased with the enhancement of UV radiation intensity.

Key words: UV; hydrogen peroxide; disinfection; *E. coli*; inactivation effect

紫外线(UV)消毒技术由于杀菌效果好、广谱性强、操作简便等优点^[1~3]而得到越来越多的关注,近些年在饮用水消毒中得到一定应用^[4~7]. 水中部分含有孢子的微生物及病毒等对紫外线具有一定的抵抗能力,需将紫外线与其它工艺相结合以提高这类微生物的灭活效果,如紫外-氯消毒^[8,9]、紫外-臭氧消毒^[10,11]、紫外-氯-氯胺消毒^[12]等.

UV/H₂O₂对水中除草剂^[13]、杀虫剂^[14,15]、药剂^[16]等多种污染物有着很好的降解作用,但其对微生物的灭活方面的研究还很少,主要集中于典型耐氯型微生物隐孢子虫^[17]、贾第鞭毛虫^[18]、腺病毒^[19]等. Mamane 等^[20]用强度为 0.78 mW·cm⁻²的

中压汞灯($\lambda > 290$ nm)照射 15 min 后,得到 MS-2 噬菌体灭活率为 0.5 lg, T7 灭活率为 2.4 lg. 添加 25 mg·L⁻¹的H₂O₂与 UV 同时反应后,MS-2 噬菌体灭活率增加 2.0 lg, T7 灭活率增加 1.0 lg. 而 Koivunen 等^[21]发现,UV/H₂O₂联合消毒较之单独 UV 消毒,对粪链球菌有明显的拮抗作用,对 MS-2 大肠杆菌噬菌体无协同作用.

收稿日期: 2012-09-29; 修订日期: 2012-11-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178323, 51108329); 中央高校基本科研业务费专项(0400219205); 住房和城乡建设部研究开发项目(2009-k7-27)

作者简介: 张一清(1991~),女,硕士研究生,主要研究方向为水处理理论与技术, E-mail: hfzyq1991@126.com

* 通讯联系人, E-mail: zhangyongji@tongji.edu.cn

本研究选取大肠杆菌代表水中微生物,对比分析了 UV 与 H_2O_2 单独及联用对大肠杆菌的灭活效果,以期今后应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验水样

大肠杆菌(编号 1.3373)由中国科学院微生物研究所提供。使用时将菌种接种到装有 100 mL 营养肉汤培养基中,于 37℃ 恒温培养箱中以 150 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 转速振荡培养 24 h。将培养后的菌液在 6 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 转速下离心 10 min,弃去上清液,将其沉淀物重新溶于一定量无菌生理盐水,配制成初始浓度约为 $10^7 \text{ CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的菌悬液作为试验水样备用。

1.2 试验装置

试验装置采用准平行光束仪(collimated beam apparatus),如图 1 所示。在不锈钢封闭腔体内安装一根功率为 75 W 低压紫外灯管(Philips),波长为 253.7 nm。腔体底部开口下接两根相互平行的不锈钢圆管,圆管长度为 60 cm,直径为 10.8 cm,其作用是产生平行紫外线使其能垂直到达样品的表面^[22]。紫外线平均强度由国际紫外线协会提供的计算表格得到^[23]。试验采用 113.0、56.5、28.3 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 共 3 个紫外线强度。紫外线强度用 UV-M 紫外辐照计(北京师范大学科学仪器厂)测定。

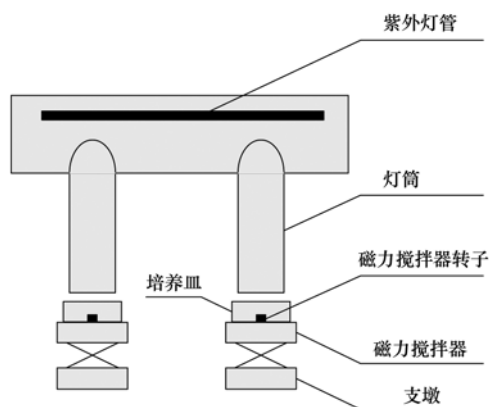


图 1 准平行光束仪装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of collimated beam device

1.3 试验方法

1.3.1 紫外线消毒

试验时取 40 mL 菌液于直径 9 cm 的培养皿中,置于准平行光束仪下进行照射,同时用磁力搅拌器快速混匀。照射一定时间后,关闭紫外遮光板,进行细菌计数,计算细菌灭活率。照射时间根据水样吸光度、紫外剂量来确定。

紫外线剂量计算公式如下:

$$D = I \cdot t \quad (1)$$

式中, D 为紫外线剂量($\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$), I 为平均紫外强度($\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$), t 为照射时间(s)。

1.3.2 H_2O_2 消毒

试验所用 H_2O_2 (国药集团)由 30% H_2O_2 稀释 5 000 倍得到,并置于棕色试剂瓶中在 4℃ 下避光保存,每次使用前用高锰酸钾法滴定其有效浓度。反应到达所需时间后加入过量 10% 无菌 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 中止反应,留作进行微生物检测。

1.3.3 UV/ H_2O_2 消毒

UV/ H_2O_2 消毒分为 UV- H_2O_2 消毒(先紫外线后 H_2O_2)、 H_2O_2 -UV 消毒(先 H_2O_2 后紫外线)、UV/ H_2O_2 同时消毒。反应时间分别为 2.5、5、10 和 20 min,所有试验双氧水反应到所需时间后用均用 10% 无菌 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 中止反应。

1.4 消毒效果评价

消毒效果依据不同紫外剂量下水样中微生物的灭活率来计算:

$$\text{灭活率} = \lg(N_0/N) \quad (2)$$

式中, N_0 为未经紫外辐照的水样中细菌个数, N 为紫外线照射一定时间后的等量水样中剩余细菌个数。

大肠杆菌的计数采用品红亚硫酸钠法^[24]。

2 结果与讨论

2.1 单独 H_2O_2 对大肠杆菌的灭活效果

试验首先考察 H_2O_2 对大肠杆菌的灭活效果, H_2O_2 浓度取 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,接触时间从 2.5 ~ 30 min,试验结果如表 1 所示。单独 H_2O_2 对大肠杆菌灭活率较低,在反应时间为 30 min 时其灭活率仅为 0.020 lg。究其原因,一方面可能由于 H_2O_2 氧化能力较低(标准电极电位 1.77 V),不足以破坏大肠杆菌的表面结构,另一方面可能由于细胞组织中存在过氧化氢酶,它能够将 H_2O_2 分解为 H_2O 和 O_2 ,阻止 H_2O_2 继续与大肠杆菌反应。这一结论与其他学者的研究数据非常吻合,如 Sommer 等^[25] 研究发现 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 H_2O_2 接触反应 3 h 后,病毒完全没有失活,细菌也仅有微量失活; Koivunen 等^[21] 将 H_2O_2 浓度提高到 $150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,但对细菌的灭活率也仅有 0.2 lg; Bianchini 等^[26] 采用 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 H_2O_2 与大肠杆菌接触反应 30 min 后,未发现灭活现象。

2.2 单独 UV 对大肠杆菌的灭活效果

紫外光强分别为 113.0、56.5、28.3 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$

表 1 不同H₂O₂接触时间下对大肠杆菌的灭活效果

Table 1 Effect of H ₂ O ₂ contact time on the inactivation of <i>E. coli</i>							
接触时间/min	2.5	5	7.5	10	15	20	30
灭活率/lg	0.045	0.034	0.052	0.067	-0.019	0.025	0.020

下,单独 UV 对大肠杆菌的灭活效果如图 2 所示. 在相同 UV 强度下,紫外线对大肠杆菌的灭活率随照射时间延长而增加,高紫外线照射剂量对大肠杆菌的灭活效果要高于低剂量. 当紫外剂量小于 10 mJ·cm⁻²时,紫外线对大肠杆菌的灭活率增长较快;当紫外剂量大于 10 mJ·cm⁻²时,灭活率增长趋于平缓. 在相同 UV 剂量下,大肠杆菌的灭活率随着 UV 光强的增加而不断提高,如当紫外线剂量为 10 mJ·cm⁻²,紫外线强度分别为 113.0、56.5、28.3 μW·cm⁻²时,对大肠杆菌的灭活率分别为 4.51 lg、3.85 lg 和 3.02 lg.

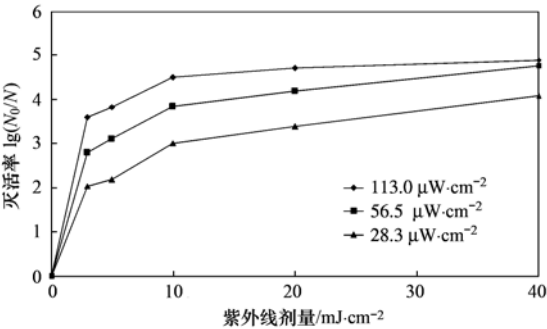


图 2 不同紫外线强度、剂量对大肠杆菌的灭活效果

Fig. 2 Effect of UV intensity and dose on the inactivation of *E. coli*

2.3 紫外线与H₂O₂联用对大肠杆菌的灭活效果

2.3.1 UV-H₂O₂对大肠杆菌的灭活效果

固定紫外光强为 113.0 μW·cm⁻²,H₂O₂浓度为 20 mg·L⁻¹(下同),比较先 UV 后H₂O₂对大肠杆菌的灭活效果. 从图 3 可以看出,先 UV 后H₂O₂消毒所得灭活率均比相同剂量下单独 UV 照射的灭活率高. 两者联用的效果与H₂O₂的作用时间有关,作用时间越长,对大肠杆菌的灭活效果越高. 当紫外线剂量为 5 mJ·cm⁻²时,单独 UV 照射后灭活率为 3.84 lg,而 UV 照射后加入H₂O₂分别反应 2.5、5、10、20 min 后,灭活率分别为 3.93 lg、4.19 lg、4.22 lg 和 4.52 lg,提高了 0.09 lg、0.35 lg、0.38 lg、0.68 lg.

2.3.2 H₂O₂-UV 对大肠杆菌的灭活效果

图 4 为先用H₂O₂消毒后用 UV 进行照射时大肠杆菌的灭活情况. 对比图 2、图 4 可以发现,两者联用的效果与紫外线的剂量有关,紫外剂量越大,与

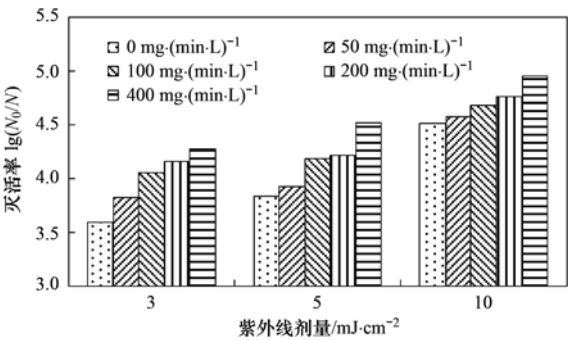


图 3 先紫外线后H₂O₂消毒对大肠杆菌的灭活效果

Fig. 3 Effect of UV followed by H₂O₂ on the inactivation of *E. coli*

H₂O₂联合消毒后灭活率增长幅度越小. 当紫外线剂量为 3 mJ·cm⁻²时,加入H₂O₂分别反应 2.5、5、10、20 min 后,灭活率较单独 UV 照射分别增长了 0.23 lg、0.46 lg、0.56 lg、0.68 lg;而当紫外线剂量为 10 mJ·cm⁻²时,加入H₂O₂分别反应 2.5、5、10、20 min 后,灭活率较单独 UV 照射分别仅增长了 0.07 lg、0.17 lg、0.25 lg、0.43 lg. 这种消毒方式相对于先 UV 后H₂O₂,对大肠杆菌的灭活效果提高较少. 如当紫外线剂量为 5 mJ·cm⁻²时,加入H₂O₂分别反应 2.5、5、10、20 min 后,灭活率分别提高了 0.01 lg、0.07 lg、0.14 lg、0.53 lg,而 UV-H₂O₂工艺的灭活率分别提高了 0.09 lg、0.35、0.38、0.68 lg.

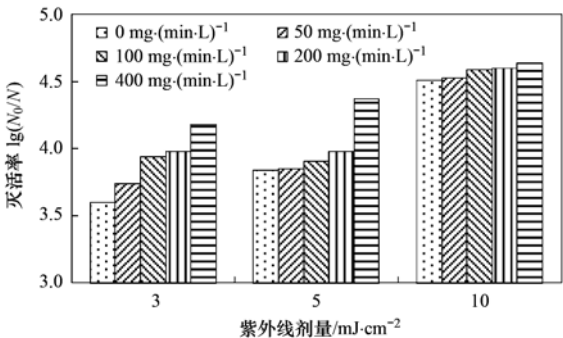


图 4 先H₂O₂后紫外线消毒对大肠杆菌的灭活效果

Fig. 4 Effect of H₂O₂ followed by UV on the inactivation of *E. coli*

2.3.3 UV/H₂O₂同时消毒对大肠杆菌的灭活效果

图 5 为 UV 与H₂O₂同时消毒对大肠杆菌的灭活效果. 从中可见,这种组合方式下大肠杆菌的灭活率得到较大增加. 如紫外线剂量为 5 mJ·cm⁻²时,加入H₂O₂分别反应 2.5、5、10、20 min 后,灭活率较

单独 UV 照射分别仅增长了 0.54 lg、0.62 lg、0.73 lg、1.11 lg, 较 UV-H₂O₂ 和 H₂O₂-UV 工艺分别增加了 0.45 lg、0.27 lg、0.35 lg、0.43 lg 和 0.53 lg、0.55 lg、0.59 lg、0.58 lg.

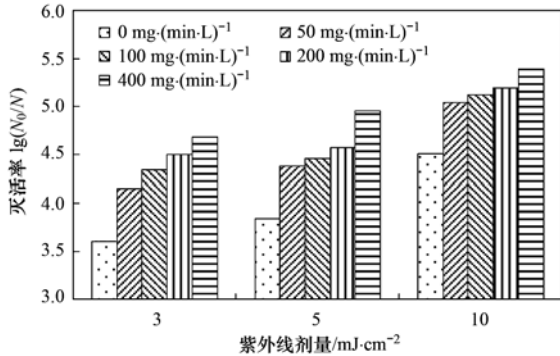


图5 紫外线和H₂O₂同时消毒对大肠杆菌的灭活效果

Fig. 5 Effect of simultaneous UV and H₂O₂ on the inactivation of *E. coli*

2.4 紫外光强的影响

固定H₂O₂浓度为20 mg·L⁻¹, 反应时间为20 min, 比较紫外光强分别为113.0、56.5、28.3 μW·cm⁻²时对大肠杆菌的灭活效果. 由图6可见, 在相同剂量下, 较高光强的灭活效果总是优于较低光强的灭活效果. 例如, 紫外线剂量为10 mJ·cm⁻²时, 光强113.0、56.5、28.3 μW·cm⁻²对大肠杆菌的灭活率分别为5.3 lg、5.15 lg、4.33 lg. 这一现象与单独紫外消毒时紫外光强与灭活率的关系相一致. 这是因为紫外光强会影响H₂O₂的光激活活性, 紫外光强的增加会促进其辐射光子数增加, 使H₂O₂产生更多的·OH, 从而提高大肠杆菌的灭活效果.

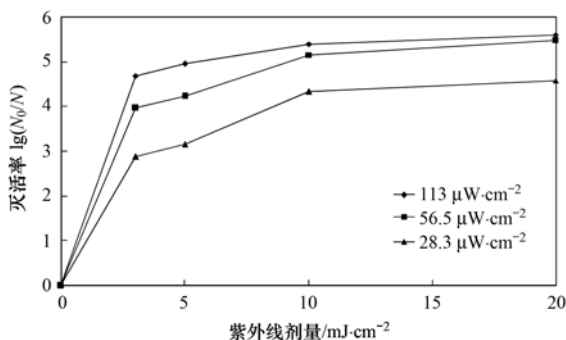


图6 不同光强对UV/H₂O₂工艺灭活大肠杆菌的影响

Fig. 6 Effect of different intensity of UV radiation on the inactivation of *E. coli* by UV/H₂O₂ process

2.5 几种消毒方法的效果比较与机制分析

固定紫外线强度113 μW·cm⁻², 剂量5 mJ·cm⁻², H₂O₂反应时间20 min, 对比单独紫外消毒以及紫外线和H₂O₂不同组合方式消毒对大肠杆

菌的灭活效果如图7所示. 单独紫外线消毒的灭活效果最差, 仅有3.84 lg, 先H₂O₂后UV工艺, 以及先UV后H₂O₂工艺的灭活率分别为4.37 lg、4.52 lg. 消毒效果最好的是UV和H₂O₂同时消毒, 其灭活率达到4.95 lg, 较单独UV消毒增加了1.11 lg.

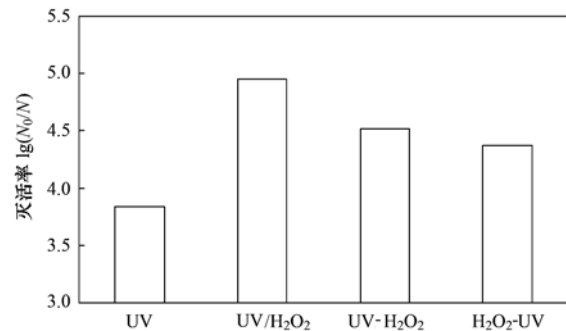


图7 紫外线和H₂O₂不同组合方式的灭活率比较

Fig. 7 Comparative effect of different combination modes of UV and H₂O₂

先H₂O₂后UV消毒的情况下, 虽然H₂O₂本身对大肠杆菌的灭活效果并不明显, 但对细菌的细胞壁、细胞膜等组织造成了一定程度的破坏^[27]. 受到损伤的细菌, 再受到UV照射等外界刺激时, 抵抗能力会降低, 更加容易灭活, H₂O₂作用时间越长, 对细菌的损伤程度也越强, 从而能杀灭更多的细菌^[28].

先UV后H₂O₂消毒的情况下, 紫外线能够高效破坏细菌的细胞膜和DNA结构, 导致细胞中过氧化氢酶的失活^[8], 加入H₂O₂进行消毒时, H₂O₂更容易进入细菌内部, 破坏其内部结构, 提高消毒效果^[9].

而UV和H₂O₂同时消毒时, UV照射H₂O₂可生成高活性的·OH, 一方面, ·OH的标准电极电位(2.70 V)大于H₂O₂的标准电极电位(1.77 V), 比H₂O₂具有更强的氧化性, 可以有效地氧化并破坏细胞膜和细胞壁, 从而有效灭活细菌. 另一方面, ·OH可以进入细胞并使细胞内的酶失活, 并使蛋白质合成受阻^[29,30]. 因此, UV和H₂O₂同时消毒比UV、H₂O₂顺序消毒获得更高的灭活效果.

3 结论

(1) 单独采用H₂O₂消毒时, 对大肠杆菌几乎无灭活效果; 采用紫外线消毒时对大肠杆菌灭活效果较好, 在紫外线光强为0.113 mW·cm⁻², 紫外剂量为10 mJ·cm⁻²时, 灭活率高于4 lg.

(2) 紫外线与H₂O₂的协同消毒可以提高对大肠杆菌的灭活效果, 先UV后H₂O₂消毒效果优于先H₂O₂后UV, 而UV与H₂O₂同时消毒效果优于UV与

H_2O_2 顺序消毒.

(3) 紫外剂量和 H_2O_2 反应时间均相同的条件下, 大肠杆菌的灭活率随着紫外线光强的增加而提高.

参考文献:

- [1] 刘文君. 给水处理消毒技术发展展望[J]. 给水排水, 2004, **31**(1): 2-5.
- [2] 张永吉, 刘文君. 紫外线对自来水中微生物的灭活作用[J]. 中国给水排水, 2005, **21**(9): 1-4.
- [3] 张伟, 陈仁灼. 北美给水厂紫外线消毒系统设计方法简介[J]. 中国给水排水, 2010, **26**(8): 50-53.
- [4] Francy D S, Stelzer E A, Bushon R N, *et al.* Comparative effectiveness of membrane bioreactors, conventional secondary treatment, and chlorine and UV disinfection to remove microorganisms from municipal wastewaters [J]. Water Research, 2012, **46**(13): 4164-4178.
- [5] Lyon B A, Dotson A D, Linden K G, *et al.* The effect of inorganic precursors on disinfection byproduct formation during UV-chlorine/chloramine drinking water treatment [J]. Water Research, 2012, **46**(15): 4653-4664.
- [6] Guo M T, Huang J J, Hu H Y, *et al.* UV inactivation and characteristics after photoreactivation of *Escherichia coli* with plasmid: Health safety concern about UV disinfection[J]. Water Research, 2012, **46**(13): 4031-4036.
- [7] Kollu K, Örmeci B. Effect of particles and bioflocculation on ultraviolet disinfection of *Escherichia coli* [J]. Water Research, 2012, **46**(3): 750-760.
- [8] 张永吉, 刘文君, 张琳. 氯对紫外线灭活枯草芽孢杆菌的协同作用[J]. 环境科学, 2006, **27**(2): 329-332.
- [9] 郭美婷, 胡洪营. 紫外线和氯组合方式对大肠杆菌灭活效果的影响研究[J]. 中国给水排水, 2007, **23**(17): 80-83.
- [10] 马晓敏, 宋强, 胡春, 等. 紫外、臭氧复合对饮用水的杀菌除微污染实验[J]. 环境科学, 2002, **23**(5): 57-61.
- [11] 吴东海, 尤宏, 孙丽欣, 等. 紫外/臭氧复合杀灭水中细菌性能研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, **42**(11): 1793-1797.
- [12] Ballester N A, Malley J P Jr. Sequential disinfection of adenovirus type 2 with UV-Chlorine-chloramine [J]. Journal American Water Works Association, 2004, **96**(10): 97-103.
- [13] Chu W. Modeling the quantum yields of herbicide 2, 4-D decay in UV/ H_2O_2 process [J]. Chemosphere, 2001, **44**(5): 935-941.
- [14] Benitez F J, Acero J L, Real F J. Degradation of carbofuran by using ozone, UV radiation and advanced oxidation processes[J]. Journal of Hazardous Materials, 2002, **89**(1): 51-65.
- [15] Zamy C, Mazellier P, Legube B. Phototransformation of selected organophosphorus pesticides in dilute aqueous solutions [J]. Water Research, 2004, **38**(9): 2305-2314.
- [16] Shemer H, Kunukcu Y K, Linden K G. Degradation of the pharmaceutical metronidazole via UV, Fenton and photo-Fenton processes[J]. Chemosphere, 2006, **63**(2): 269-276.
- [17] Zimmer J L, Slawson R M, Huck P M. Inactivation and potential repair of *Cryptosporidium parvum* following low- and medium-pressure ultraviolet irradiation [J]. Water Research, 2003, **37**(14): 3517-3523.
- [18] Craik S A, Finch G R, Bolton J R, *et al.* Inactivation of *Giardia muris* cysts using medium-pressure ultraviolet radiation in filtered drinking water [J]. Water Research, 2000, **34**(18): 4325-4332.
- [19] Bounty S, Rodriguez R A, Linden K G. Inactivation of adenovirus using low-dose UV/ H_2O_2 advanced oxidation [J]. Water Research, 2012, **46**(19): 6273-6278.
- [20] Mamane H, Shemer H, Linden K G. Inactivation of *E. coli*, *B. subtilis* spores, and MS2, T4, and T7 phage using UV/ H_2O_2 advanced oxidation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, **146**(3): 479-486.
- [21] Koivunen J, Heinonen-Tanski H. Inactivation of enteric microorganisms with chemical disinfectants, UV irradiation and combined chemical/UV treatments [J]. Water Research, 2005, **39**(8): 1519-1526.
- [22] Pontius F W. Regulations in 2000 and beyond [J]. Journal American Water Works Association, 2000, **92**(3): 40-53.
- [23] Sommer R, Pribil W, Appelt S, *et al.* Inactivation of bacteriophages in water by means of non-ionizing (UV-253. 7 nm) and ionizing (gamma) radiation: a comparative approach [J]. Water Research, 2001, **35**(13): 3109-3116.
- [24] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [25] Sommer R, Pribil W, Pflieger S, *et al.* Microbicidal efficacy of an advanced oxidation process using ozone/hydrogen peroxide in water treatment [J]. Water Science and Technology, 2004, **50**(1): 159-164.
- [26] Bianchini R, Calucci L, Lubello C, *et al.* Intermediate free radicals in the oxidation of wastewaters [J]. Research on Chemical Intermediates, 2002, **28**(2-3): 247-256.
- [27] Virto R, Manas P, Alvarez I, *et al.* Membrane damage and microbial inactivation by chlorine in the absence and presence of a chlorine-demanding substrate [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, **71**(9): 5022-5028.
- [28] 郭建伟, 高乃云, 殷娣娣, 等. UV/ H_2O_2 工艺降解微囊藻毒素-LR [J]. 环境科学, 2009, **30**(2): 457-462.
- [29] Watts R J, Kong S H, Orr M P, *et al.* Photocatalytic inactivation of coliform bacteria and viruses in secondary wastewater effluent [J]. Water Research, 1995, **29**(1): 95-100.
- [30] Cho M, Chung H, Yoon J. Disinfection of water containing natural organic matter by using ozone-initiated radical reactions [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2003, **69**(4): 2284-2291.

CONTENTS

Concentrations and Ozone Formation Potentials of BTEX During 2008-2010 in Urban Beijing, China	CAO Han-yu, PAN Yue-peng, WANG Hui, <i>et al.</i> (2065)
Aging and Mixing State of Particulate Matter During Aerosol Pollution Episode in Autumn Shanghai Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	MU Ying-ying, LOU Sheng-rong, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (2071)
Chemical Characteristics and Source Assessment of Rainwater at Shenyang	ZHANG Lin-jing, ZHANG Xiu-ying, JIANG Hong, <i>et al.</i> (2081)
Variation of Atmospheric Pollutants in Qinhuangdao City	LIU Lu-ning, SHEN Yu-xuan, XIN Jin-yuan, <i>et al.</i> (2089)
NH ₃ , N ₂ O, CH ₄ and CO ₂ Emissions from Growing Process of Caged Broilers	ZHOU Zhong-kai, ZHU Zhi-ping, DONG Hong-min, <i>et al.</i> (2098)
Synergetic Effects of Silicon Carbide and Molecular Sieve Loaded Catalyst on Microwave Assisted Catalytic Oxidation of Toluene	WANG Xiao-hui, BO Long-li, LIU Hai-nan, <i>et al.</i> (2107)
Removal of Mixed Waste Gases by the Biotrickling Filter	ZHANG Ding-feng, FANG Jun-yi, YE Jie-xu, <i>et al.</i> (2116)
Decomposition of Carbon Disulfide by Pulse Corona Under Oxidizing and Reducing Atmosphere	JIN Sheng, HUANG Li-wei, LI Guo-ping (2121)
Effects of Simulated Elevation of Atmospheric CO ₂ Concentration on the Physiological Features of Spring Phytoplankton in Taihu Lake	ZHAO Xu-hui, TANG Long-sheng, SHI Xiao-li, <i>et al.</i> (2126)
A New Method for Estimation of the Lake Quality Reference Condition	HUA Zu-lin, WANG Liang (2134)
Parameter Sensitivity Analysis of Runoff Simulation and Model Adaptability Research Based on HSPF	LI Yan, LI Zhao-fu, XI Qing (2139)
Study on Water Quality Monitoring Scheme Based on Non-Point Source Pollution	WU Xi-jun, LI Huai-en, LI Jia-ke, <i>et al.</i> (2146)
Characteristics of Nutrient Loss by Runoff in Sloping Arable Land of Yellow-brown Under Different Rainfall Intensities	CHEN Ling, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i> (2151)
Distribution of Dissolved Inorganic Nutrients and Dissolved Oxygen in the High Frequency Area of Harmful Algal Blooms in the East China Sea in Spring	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, CHEN Peng, <i>et al.</i> (2159)
Temporal-Spatial Distribution of Algal Cells During Drought Period in Daning River of Three Gorges	ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, WANG Kun, <i>et al.</i> (2166)
Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen Components in the Lake Sediment to Algae	FENG Wei-ying, ZHANG Sheng, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2176)
Influence of Decomposition of <i>Cladophora</i> sp. on Phosphorus Concentrations and Forms in the Overlying Water	HOU Jin-zhi, WEI Quan, GAO Li, <i>et al.</i> (2184)
Phosphorus Exchange Between Suspended Solids Sediments Overlying Water Under Repeated Disturbance	LI Da-peng, WANG Jing, HUANG Yong (2191)
Distribution Characteristics of PBDEs in Surface Sediment from the Three Gorges Reservoir of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2198)
Study on UV and H ₂ O ₂ Combined Inactivation of <i>E. coli</i> in Drinking Water	ZHANG Yi-qing, ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji (2205)
Kinetics and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate Degradation in Aqueous Solution by Ozonation	YU Li, ZHANG Pei-long, HOU Jia-cai, <i>et al.</i> (2210)
Effects of Nitrate Ion on Monomethylmercury Photodegradation in Water Body	MAO Wen, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2218)
Chlorination of Ethynyl Estradiol: A Kinetic and Mechanistic Study	WANG Bin-nan, LIU Guo-qiang, KONG De-yang, <i>et al.</i> (2225)
Metal Ions Restrained the Elimination of 4- <i>tert</i> -Octylphenol by δ -MnO ₂	LI Fei-li, MOU Hua-qian (2232)
Removal of Bisphenol A in Aqueous Solutions by Core-shell Magnetic Molecularly Imprinted Polymers	LIU Jian-ming, LI Hong-hong, XIONG Zhen-hu (2240)
Research on Removal of Tetrabromobisphenol A from Synthetic Wastewater by Nanoscale Zero Valent Iron Supported on Organobentonite	YAN Meng-yue, PANG Zhi-hua, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (2249)
Measurement of Dissolved Organic Nitrogen with Nanofiltration Pretreatment and Its Distribution Characteristics in Landscape Water	YU Hong-lei, HUO Shou-liang, YANG Zhou-sheng, <i>et al.</i> (2256)
Preparation of a Novel Modified Hydrogel and Study of Its Adsorption Performance	WU Ning-mei, LI Zheng-kui (2263)
Photocatalytic Reductive Degradation of Direct Red 4BE by Phosphotungstic Acid	WEI Hong, LI Ke-bin, LI Juan, <i>et al.</i> (2271)
Wastewater Treatment Using a Microbubble Aerated Biofilm Reactor	ZHANG Lei, LIU Ping, MA Jin, <i>et al.</i> (2277)
Research on Fenton Treatment of the Biochemical Processes Effluent of Bamboo Industry Wastewater	GUO Qing-wen, ZHANG Min, WANG Wei, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Fe ²⁺ on Fermentation Hydrogen Production in an UASB	LI Yong-feng, WANG Yi-xuan, CHENG Guo-ling, <i>et al.</i> (2290)
Influence of Substrate Concentration on PHA Production Using Fermented Sugar Cane as Substrate	CHEN Zhi-qiang, DENG Yi, HUANG Long, <i>et al.</i> (2295)
Study on Rapid Start-up of a Nitrifying Process Using Aerobic Granular Sludge as Seed Sludge	LIU Wen-ru, SHEN Yao-liang, DING Ling-ling, <i>et al.</i> (2302)
Influencing Factors of High-Concentration Lead Removal Using the Phosphorus-Accumulating Sludge	YANG Min, LU Long, FENG Yong, <i>et al.</i> (2309)
Preliminary Study on Characteristics of Volumetric Oxygen Transfer Coefficient in Granular Sludge Systems	LI Zhi-hua, FAN Chang-qing, WANG Xiao-chang (2314)
Ecological Risk Assessment of Bisphenol A in Chinese Freshwaters	WANG Hao, FENG Cheng-lian, GUO Guang-hui, <i>et al.</i> (2319)
Species Sensitivity Evaluation of <i>Pseudorasbora parva</i>	WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (2329)
Comparison of Aquatic Predicted No-Effect Concentrations (PNECs) for Pentachlorophenol Derived from Different Assessment Approaches	LEI Bing-li, WEN Yu, WANG Yi-pei, <i>et al.</i> (2335)
Study on Hair Hg and Pb Content Distribution of Traffic Polices, Guilin	QIAN Jian-ping, ZHANG Li, LI Cheng-chao, <i>et al.</i> (2344)
Changes in Phototoxic Index of <i>Daphnia carinata</i> Under Electric Field of Direct Current in Response to Cr ⁶⁺ and Hg ²⁺	WANG Fei-xiang, YUAN Ling, HUANG Jian-guo (2350)
Effect of UV-B Radiation on the Chemical Composition and Subsequent Decomposition of <i>Cyclobalanopsis glauca</i> Leaf Litter	SONG Xin-zhang, BU Tao, ZHANG Shui-kui, <i>et al.</i> (2355)
Leaf Micro-morphology and Features in Adsorbing Air Suspended Particulate Matter and Accumulating Heavy Metals in Seven Tress Species	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (2361)
Effect of Dissolved Oxygen on Microbial Community in Simultaneous Removal of Carbon, Nitrogen and Sulfur Process	YU Hao, CHEN Chuan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (2368)
Microbial Activity and Community Structure Analysis Under the Different Land Use Patterns in Farmland Soils: Based on the Methods PLFA and MicroResp TM	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (2375)
Effects of Drying-rewetting Alternation on Nitrogen Dynamics in a Typical Coastal Wetland: A Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (2383)
Cadmium and Selected Heavy Metals in Soils of Jianping Area in Wushan County, the Three Gorges Region: Distribution and Source Recognition	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, NING Zeng-ping, <i>et al.</i> (2390)
Total Contents of Heavy Metals and Their Chemical Fractionation in Agricultural Soils at Different Locations of Beijing City	CHEN Zhi-fan, ZHAO Ye, GUO Ting-zhong, <i>et al.</i> (2399)
Influence of Season Change on the Level of Heavy Metals in Outdoor Settled Dusts in Different Functional Areas of Guiyang City	LI Xiao-yan (2407)
Characteristics of Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls Contamination in Soils of Gudao Region in Dongying	WANG Deng-ge, CUI Zhao-jie, FU Xiao-wen, <i>et al.</i> (2416)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Organic Matter Leaching in Forest Soil	DUAN Lei, MA Xiao-xiao, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2422)
<i>Ex-situ</i> Remediation of PAHs Contaminated Site by Successive Methyl- β -Cyclodextrin Enhanced Soil Washing	SUN Ming-ming, TENG Ying, LUO Yong-ming, <i>et al.</i> (2428)
Effects of <i>Bacillus mucilaginosus</i> on the Cd Content of Rhizosphere Soil and Enzymes in Soil of <i>Brassica juncea</i>	YANG Rong, LI Bo-wen, LIU Wei (2436)
Concentrations of Antibiotics in Vegetables from Manure-mended Farm	WU Xiao-lian, XIANG Lei, MO Ce-hui, <i>et al.</i> (2442)
Characteristics of Organic Nitrogen Mineralization in Organic Waste Compost-Amended Soil	ZHANG Xu, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (2448)
Characteristics and Influence Factors of the Energy Consumption and Pollutant Discharge of Municipal Solid Waste Transfer Stations in Beijing	WANG Zhao, LI Zhen-shan, FENG Ya-bin, <i>et al.</i> (2456)
Influence of Ammonia on Leaching Behaviors of Incineration Fly Ash and Its Geochemical Modeling	GUAN Zhen-zhen, CHEN De-zhen, Thomas Astrup (2464)
Pretreatment Technology for Fly Ash from MSWI and the Corresponding Study of Chloride Behavior	ZHU Fen-fen, Takaoka Masaki, Oshita Kazuyuki, <i>et al.</i> (2473)
Preparation, Characterization and Adsorption Performance of Mesoporous Activated Carbon with Acidic Groups	LI Kun-quan, LI Ye, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (2479)
Preliminary Assessment of the Potential of Biochar Technology in Mitigating the Greenhouse Effect in China	JIANG Zhi-xiang, ZHENG Hao, LI Feng-min, <i>et al.</i> (2486)
Research of Potassium Flow and Circulation Based on Substance Flow Analysis	BAI Hua, ZENG Si-yu, DONG Xin, <i>et al.</i> (2493)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年6月15日 34卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 6 Jun. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行