

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第4期

Vol.35 No.4

2014

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 ~2012 年上海黑碳浓度变化特征分析	王洪强, 贺千山, 陈勇航, 亢燕铭 (1215)
乌鲁木齐市东南郊一次降雪过程的化学组成及其悬浮态颗粒形态特征	陆辉, 魏文寿, 崔彩霞, 何清, 王瑶 (1223)
典型地区大气中多溴联苯醚和新型溴代阻燃剂的水平及组成分布	吴辉, 金军, 王英, 李明圆, 何松洁, 徐萌, 孙一鸣 (1230)
某焦化厂周边大气 PM ₁₀ 重金属来源及健康风险评价	董婷, 李天昕, 赵秀阁, 曹素珍, 王贝贝, 马瑾, 段小丽 (1238)
基于车流和大气污染物浓度同步增量的机动车平均排放因子估算方法	李润奎, 赵彤, 李志鹏, 丁文军, 崔晓勇, 许群, 宋现锋 (1245)
珠江三角洲地区硫和氮沉降临界负荷研究	孙成玲, 谢绍东 (1250)
低温等离子体-生物法处理硫化氢气体研究	李华琴, 何觉聪, 陈洲洋, 黎宝仁, 黄倩茹, 张再利, 魏在山 (1256)
太子河流域莠去津的空间分布及风险评价	郑磊, 张依章, 张远, 朱鲁生, 王志强 (1263)
一种大批量测定沉积物微量间隙水样品中溶解态磷和铁含量的方法	王燕, 朱春刚, 许笛, 丁士明 (1271)
外源营养盐输入后水体中营养盐浓度的时空变化	傅玲, 赵凯, 王国祥, 欧媛, 范嫻, 毛丽娜, 张佳, 韩睿明 (1278)
基于物理过程的矿区地下水污染风险评价	孙法圣, 程品, 张博 (1285)
重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究	杨平恒, 卢丙清, 贺秋芳, 陈雪彬 (1290)
重庆老龙洞地下河流域氮、磷及微生物污染调查研究	蓝家程, 杨平恒, 任坤, 陈雪彬, 徐昕, 胡宁 (1297)
苦草 (<i>Vallisneria spiralis</i>) 根系对沉积物中各形态磷的影响	李振国, 王国祥, 张佳, 马久远, 魏宏农, 俞振飞 (1304)
循环廊道湿地中氮归趋过程模拟研究	彭剑峰, 宋永会, 袁鹏, 张雪妍, 胡小明 (1311)
不同环境因素下太湖中四环素的自然消减	段伦超, 王凤贺, 纪莹雪, 张帆, 赵斌, 王国祥 (1318)
再生水中 5 种抗生素抗性菌的紫外线灭活及复活特性研究	黄晶晶, 汤芳, 席劲璇, 庞宇辰, 胡洪营 (1326)
二级处理出水的 UV-TiO ₂ 消毒及大肠杆菌和粪肠球菌光复活试验	王西峰, 龚昕, 胡晓莲, 任伯帆 (1332)
水中 C ₆₀ 纳米颗粒的稳定性研究	方华, 沈冰冰, 荆洁, 陆继来, 王媛 (1337)
XDLVO 理论解析不同离子条件下海藻酸钠微滤膜污染	赵应许, 纵瑞强, 高欣玉, 谢慧君, 殷永泉, 梁爽 (1343)
纳米零价铁催化过氧化氢强化修复 4-氯硝基苯污染地下水的研究	付融冰 (1351)
共存氯苯类同系物对六氯苯厌氧降解活性的影响	王琪, 刘辉, 姜林, 唐军 (1358)
硫酸盐还原生物滤池对含镉废水去除效果试验研究	吴宣, 谭科艳, 胡希佳, 顾远, 杨宏 (1366)
基于氮平衡原理对南方污水处理厂中试脱氮工艺调控策略研究	姜应和, 刘佩炬, 王磊, 田中凯, 刘小英 (1372)
模拟电镀污泥阴离子浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响	陈燕, 黄芳, 谢鑫源 (1377)
电活性生物膜介导 Cu ²⁺ 生物还原的试验研究	刘毅, 周顺桂, 袁勇, 刘志 (1384)
模拟废旧线路板生物浸出液中铜的回收	程丹, 朱能武, 吴平霄, 邹定辉, 邢翊佳 (1391)
填埋垃圾浸提液与地下水污染物组成差异及成因	何小松, 余红, 席北斗, 崔东宇, 潘红卫, 李丹 (1399)
化学合成施氏矿物与 H ₂ O ₂ 共存体系下光化学处理垃圾渗滤液的研究	王鹤茹, 宋永伟, 徐峙辉, 崔春红, 周立祥 (1407)
处理 BPA 模拟废水的 SBR 工况参数对污泥有机毒性的影响研究	杨娜, 陈秀荣, 林逢凯, 黄华, 章斐, 赵骏, 丁毅 (1414)
剩余污泥厌氧消化甲烷生成势与产甲烷菌多样性的比较研究	董慧岭, 季民 (1421)
锰氧化菌 <i>Aminobacter</i> sp. H1 的分离鉴定及其锰氧化机制研究	晏平, 姜理英, 陈建孟, 何智敏, 肖少丹, 蒋铁锋 (1428)
1 株铁基质自养反硝化菌的脱氮特性	王弘宇, 杨开, 张倩, 季斌, 陈丹, 孙宇翀, 田俊 (1437)
碘普罗胺降解菌 <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 共代谢降解性能研究	徐冰洁, 高品, 薛昱, 何梦琦, 吴凡 (1443)
利用流式细胞术研究鞘氨醇单胞菌 GY2B 降解非过程中细菌表面特性的变化	张梦露, 党志, 伍凤姬, 梁旭军, 郭楚玲, 卢桂宁, 杨琛 (1449)
毒性有机物 BPA 与普通小球藻的相互影响特性研究	陈善佳, 陈秀荣, 闫龙, 赵建国, 章斐, 江子建 (1457)
缺镁胁迫对普通小球藻光合生理及油脂积累的影响	王珊, 赵树欣, 魏长龙, 于水燕, 史吉平, 张保国 (1462)
微囊藻毒素对水稻根系生长和抗氧化系统的影响	王妮敏, 邓琦, 邹华, 梁婢娟 (1468)
东北春大豆品种东生 1 号对臭氧胁迫的响应	张巍巍, 王光华, 王美玉, 刘晚冰, 冯兆忠 (1473)
生物结皮的发育演替与微生物生物量变化	吴丽, 张高科, 陈晓国, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1479)
老化土壤中铅对赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响	陈丽红, 刘征涛, 方征, 王晓南, 王婉华 (1486)
土壤重金属镉标准值差异比较研究与建议	赵晓军, 陆泗进, 许人骥, 李伯苓, 吴国平, 魏复盛 (1491)
藏北可可西里地区土壤元素背景值研究	柏建坤, 王建力, 李潮流, 康世昌, 陈鹏飞 (1498)
三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析	胥焘, 王飞, 郭强, 聂小倩, 黄应平, 陈俊 (1502)
浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析	厉炯慧, 翁珊, 方婧, 黄佳蕾, 陆芳华, 卢宇浩, 张洪铭 (1509)
西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征	张海珍, 唐宇力, 陆骏, 周虹, 徐芸茜, 陈川, 赵赞, 王美娥 (1516)
生活垃圾焚烧厂周边土壤汞污染特征及评价	解惠婷, 张承中, 徐峰, 李海凤, 田振宇, 唐琛, 刘文彬 (1523)
上海滴水湖周边土壤和沉积物对磷的吸附特征	诸葛祥真, 毕春娟, 陈振楼, 张焕焕, 倪玮怡 (1531)
SDBS/Na ⁺ 对红壤胶体悬液稳定性的影响	唐颖, 李航, 朱华玲, 田锐, 高晓丹 (1540)
稳定化处理对矿渣中重金属迁移转化的影响研究	赵述华, 陈志良, 张太平, 潘伟斌, 彭晓春, 车融, 欧英娟, 雷国建, 周鼎 (1548)
藻类水体 Cd ²⁺ 毒性快速监测新方法研究	段静波, 刘文清, 张玉钧, 赵南京, 殷高方, 肖雪, 余晓娅, 方丽 (1555)
用于 1,3-二硝基苯快速检测的免疫传感器研究	龙峰, 施汉昌, 王洪臣, 盛建武 (1561)
Mg/Al 水滑石微波共沉淀法合成及其对 BrO ₃ ⁻ 吸附性能的研究	钟琼, 李欢 (1566)
污染场地修复决策支持系统的几个关键问题探讨	廖晓勇, 陶欢, 阎秀兰, 赵丹, 林龙勇, 李尤 (1576)
城市区域土壤铅含量空间变异的多尺度研究进展	杨孟, 李凤英, 刁一伟, 吴丹 (1586)
水中细菌内毒素污染特性及检测方法研究进展	张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 杨毅, 安代志 (1597)
六价铬细菌还原的分子机制研究进展	李斗, 赵由才, 宋立岩, 尹雅洁, 王洋清, 徐中慧 (1602)
农副食品加工业高浓度废水的厌氧膜生物反应器技术	魏源送, 郁达伟, 曹磊 (1613)
《环境科学》征稿简则 (1427) 《环境科学》征订启事 (1497) 信息 (1383, 1390, 1398, 1560)	

二级处理出水的 UV-TiO₂ 消毒及大肠杆菌和粪肠球菌光复活试验

王西峰, 龚昕, 胡晓莲, 任伯帜

(湖南科技大学土木工程学院, 湘潭 411201)

摘要: 对污水处理厂二级处理出水进行 UV 和 UV-TiO₂ 光催化消毒, 研究了复活光强度 (0 ~ 41 μW·cm⁻²) 对不同方法消毒后水中大肠杆菌和粪肠球菌复活的影响。结果表明, UV-TiO₂ 消毒效率远高于单纯的 UV 消毒。大肠杆菌经 UV-TiO₂ 消毒后, 只有在较强的复活光照射下才会产生一定的光复活, 而单纯 UV 消毒后即使在较低的复活光强下也会出现较强的光复活。UV-TiO₂ 消毒对粪肠球菌的光复活现象抑制明显, 在小于 21 μW·cm⁻² 的低复活光照射下粪肠球菌经 72 h 照射后几乎不发生光复活现象, 只有在较强的复活光照射下才会产生一定的光复活。

关键词: 二级出水; UV-TiO₂ 消毒; 光复活; 大肠杆菌; 粪肠球菌

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)04-1332-05 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.04.018

Photoreactivation of *Escherichia coli* and *Enterococcus faecalis* in the Secondary Effluent Disinfected by UV-TiO₂

WANG Xi-feng, GONG Xin, HU Xiao-lian, REN Bo-zhi

(School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Effects of photoreactivating light intensity (0–41 μW·cm⁻²) on photoreactivation of *Escherichia coli* (*E. coli*) and *Enterococcus faecalis* (*E. faecalis*) in the secondary effluent after UV and UV-TiO₂ disinfection were investigated. The results indicated that the disinfection efficiency of UV-TiO₂ was much higher than that of UV disinfection. The photoreactivation rate of *E. coli* was much higher in UV disinfection than that in UV-TiO₂ disinfection. Under high light intensity in UV-TiO₂ disinfection, high resurrection rate can be induced. However, a higher resurrection rate can be introduced even under low light intensity in the UV disinfection. Meanwhile, UV-TiO₂ disinfection had a strong inhibition effect on *E. faecalis* photoreactivation, when the light intensity was lower than 21 μW·cm⁻², there was no resurrection occurred on *E. faecalis* after 72 h resurrection irradiation, only under a strong photoreactivating light intensity, the resurrection rate of *E. faecalis* was observed.

Key words: secondary effluent; UV-TiO₂ disinfection; photoreactivation; *E. coli*; *E. faecalis*

城市污水处理厂的尾水是一种非常稳定的城市水资源, 将其再生利用可有效地缓解城市水资源短缺, 尤其对工业用水的短缺具有非常重要的作用。无论出水直接排放还是深度处理后作为水资源回用工业, 处理技术的最后环节均要求进行消毒, 消毒是保障出水安全性的重要措施, 紫外线消毒具有效率高、消毒副产物少、操作简单等特点, 是污水处理厂最常用的消毒工艺, 但紫外线不具有持久消毒能力, 因而尾水中的细菌存在二次复活的能力^[1~3]。因此, 提高出水中紫外光消毒效果, 抑制出水中微生物的光复活是当前紫外光消毒研究的热点之一。

TiO₂ 多相光催化氧化能力强, 能无选择地将水中难降解的污染物氧化为水、CO₂ 和 N₂ 等无机小分子物质^[4,5], 对水中细菌也具有强烈的广谱消毒能力, 其消毒能力主要是通过破坏细菌的代谢、破坏细菌体内的遗传物质或破坏细胞壁(膜)结构等作用^[6,7], 将其与紫外光消毒结合已经成为消毒技

术研究的热点之一^[8,9]。

本文拟采用 TiO₂ 光催化与紫外光消毒技术相结合, 进行水中细菌的灭活性能研究, 并对单纯 UV 消毒和 UV-TiO₂ 两种不同方法消毒后水中大肠杆菌和粪肠球菌的光复活性能进行研究, 分析 UV-TiO₂ 光催化联合消毒对再生水中大肠杆菌和粪肠球菌光复活能力的影响。

1 材料与方法

1.1 材料

菌种: 大肠杆菌 (*Escherichia coli*, 1.1563) 菌种购于中国普通微生物菌种保藏管理中心, 将菌种接种到乳糖蛋白胨培养液中, 恒温培养 24 h, 配制成试验用大肠

收稿日期: 2013-07-21; 修订日期: 2013-11-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51174090)

作者简介: 王西峰(1974~), 男, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为水污染控制理论与技术, E-mail: wxfwk88@163.com

杆菌悬液.粪肠球菌(*Enterococcus faecalis*,1.2003) 菌种购于中国普通微生物菌种保藏管理中心,将菌种接种到 EC 肉汤管内,置 44.5℃ ±0.2℃ 水浴箱内,培养 24 h ±2 h 后,配制成试验用粪肠球菌悬液.

水样:取污水处理厂二次沉淀池出水(水质见表 1),将 -80℃ 冰箱中的冰冻菌种融化后大肠杆菌和粪肠球菌菌悬液各接种 100 mL 于 1 000 mL 营养

肉汤培养基中,置于 37℃ 的振荡培养箱中培养 24 h,而后于 10 000 r·min⁻¹ 离心 10 min,弃去上清液,用灭菌生理盐水冲洗 2 次,重复离心分离 10 min 两次,最后将沉淀物溶于二次沉淀池出水中得到初始浓度约为 10⁵ CFU·L⁻¹ 的菌悬液试验水样,用以模拟污水处理厂二沉池出水的中的致病菌,该水样的保藏时间不超过 24 h.

表 1 污水处理厂出水水质
Table 1 Water quality of the secondary effluent

COD/mg·L ⁻¹	DOC/mg·L ⁻¹	UV ₂₅₄ /cm ⁻¹	浊度/NTU	pH
61 ~ 73	1.4 ~ 3.2	0.10 ~ 0.13	0.7 ~ 1.4	7.1 ~ 7.3

1.2 试验装置

试验装置如图 1 所示,采用自制光催化反应器,反应器中心区为紫外灯区,由低压汞灯提供紫外光,最外部为冷却水套管,中部为反应区,在反应区装填有玻璃纤维负载 TiO₂/Fe³⁺ 光催化填料(填料装填量为 1.533 kg, TiO₂ 负载量为 78.17 g,文中将其简称为 TiO₂ 光催化填料),为了对比 TiO₂ 光催化消毒的效果,单纯 UV 消毒时在反应区装填有未负载 TiO₂ 的玻璃纤维.采用不同功率的灯管以实现不同紫外光强度,以反应区外径处所测得有效紫外光强度为参考,每次试验前首先进行 2 h 的灯管预热以稳定紫外灯管的工况.

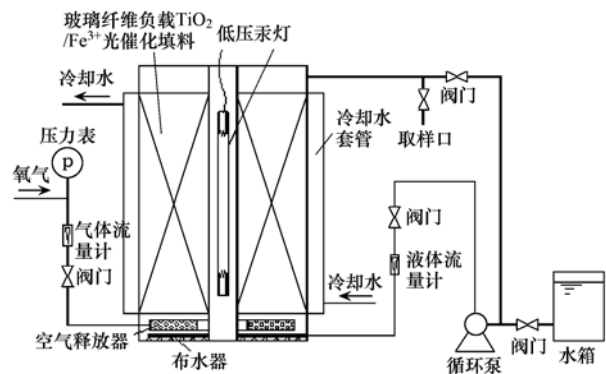


图 1 消毒反应流程
Fig. 1 Experimental process

1.3 消毒试验

在如图 1 所示光催化反应器内,测试水样在 254 nm 波长下的吸光度,采用 UV-A 型紫外辐照计测得反应器外壁处紫外线强度为 0.24 mW·cm⁻²,在此强度下计算不同紫外剂量下的消毒时间^[10],相应的 5 mJ·cm⁻²和 20 mJ·cm⁻²紫外光剂量下的消毒时间分别为 21 s 和 83.3 s.

1.4 消毒后细菌的光复活试验

经消毒后的水样立即进行光复活试验.试验在一个矩形水槽内进行,以 40 W 日光灯模拟太阳光,调整光源与水面的距离,研究在 365 nm 处 9、21 和 41 μW·cm⁻²光源强度下水中细菌的光复活情况,以细菌浓度为考察目标,试验中未考虑空气中微生物对试验结果的影响.

1.5 细菌的计数方法

细菌计数采用平板菌落计数法,将一定量稀释后的水样和融化的营养琼脂培养基混合摇匀后置于 37℃ 培养箱中培养 24 h,计算平板上的菌落数,从而确定水中的细菌浓度^[11],同一个水样做 3 个平行样.

2 结果与讨论

2.1 不同消毒方式对污水处理厂出水中大肠杆菌消毒效果的影响

水样分别在 5 mJ·cm⁻²和 20 mJ·cm⁻²紫外光剂量条件下,经单纯 UV 消毒和 UV-TiO₂ 光催化联合消毒,对大肠杆菌的消毒效果如图 2 所示.

根据《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002),出水中粪大肠菌群数的一级 A 排放

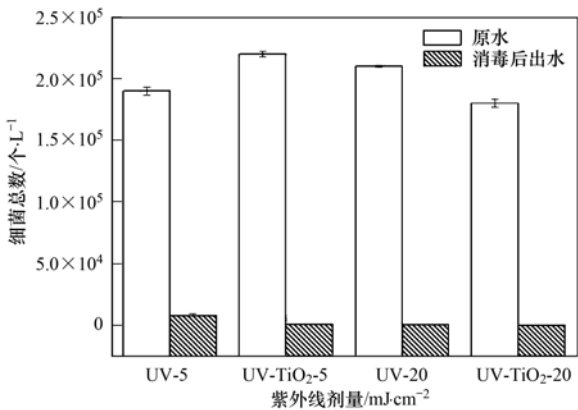


图 2 不同消毒条件对大肠杆菌的消毒效果

Fig. 2 Effects of disinfection method on *E. coli* disinfection

标准为 $1\,000\text{ 个}\cdot\text{L}^{-1}$,而根据《室外排水设计规范》(GB 50014-2006)中对紫外线消毒的规定,二级处理出水的紫外线剂量为 $15\sim 22\text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$.由图2可见,当紫外线剂量为 $5\text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时,消毒后水中大肠杆菌数量为 $7\,600\text{ 个}\cdot\text{L}^{-1}$,灭活率为96%,由此可见低剂量时单纯UV消毒是不能满足排放标准的.而当采用UV-TiO₂光催化联合消毒时,即使在 $5\text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 低剂量条件下,消毒后水中的大肠杆菌也仅有 $734\text{ 个}\cdot\text{L}^{-1}$,细菌的灭活率为99.7%,已经满足排放标准.由图2中还可以看出,在UV-TiO₂消毒条件下, $5\text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 和 $20\text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 紫外剂量下水中大肠杆菌的数量分别为 $734\text{ 个}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $176\text{ 个}\cdot\text{L}^{-1}$,灭活率分别为99.7%和99.9%,均可满足排放标准.而在同为 $20\text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的消毒剂量下,单纯UV消毒后大肠杆菌的数量为 $620\text{ 个}\cdot\text{L}^{-1}$,虽然也达到了排放标准,但是其灭活率低于UV-TiO₂联合消毒.而对于粪肠球菌的消毒结论与大肠杆菌相类似,均存在UV-TiO₂联合消毒效果高于单纯UV消毒效果.因此采用UV-TiO₂可以节省消毒时的能量消耗,且可以达到更高的致病菌灭活效果.分析其原因,主要在于两种方法的消毒原理不同.单纯UV消毒过程中,紫外光能够穿透细胞机体并破坏微生物细胞内DNA或RNA的分子结构,造成生长性细胞死亡或破坏细胞的再生性能,或利用紫外光的能量引起微生物体内蛋白质的变性,使细胞内酶系失去作用而引起细胞死亡,达到灭菌的效果^[12,13].而UV-TiO₂消毒过程中,对细菌的灭活主要是UV消毒和高级氧化消毒的联合作用.首先是紫外光对水中微生物的灭活作用,同时,在紫外光的激发作用下,TiO₂表面生成具有强氧化作用的羟基自由基($\cdot\text{OH}$),羟基自由基($\cdot\text{OH}$)氧化微生物细胞内的辅酶A,阻止微生物的呼吸作用,引起微生物的死亡.羟基自由基($\cdot\text{OH}$)的分子结构很小,很容易渗透进入微生物细胞内部,破坏细菌细胞壁的渗透作用,引起微生物体内电解质的失衡而死亡.羟基自由基($\cdot\text{OH}$)的强氧化性还可以使细胞内蛋白质变性,从而使微生物细胞内的酶系失去作用.最后,具有强氧化作用的羟基自由基($\cdot\text{OH}$)还可以直接氧化微生物细胞物质为CO₂、H₂O等无机物,从而引起微生物的死亡^[14~17].因此,UV-TiO₂联合作用消毒效率要远高于单纯紫外光消毒.

2.2 复活光强对大肠杆菌光复活的影响

含有大肠杆菌的水样分别经过 $20\text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 单纯UV和 $20\text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ UV-TiO₂光催化消毒后,出水

置于不同复活光强度下进行照射,从而得到细菌的光复活情况,试验结果如图3所示.

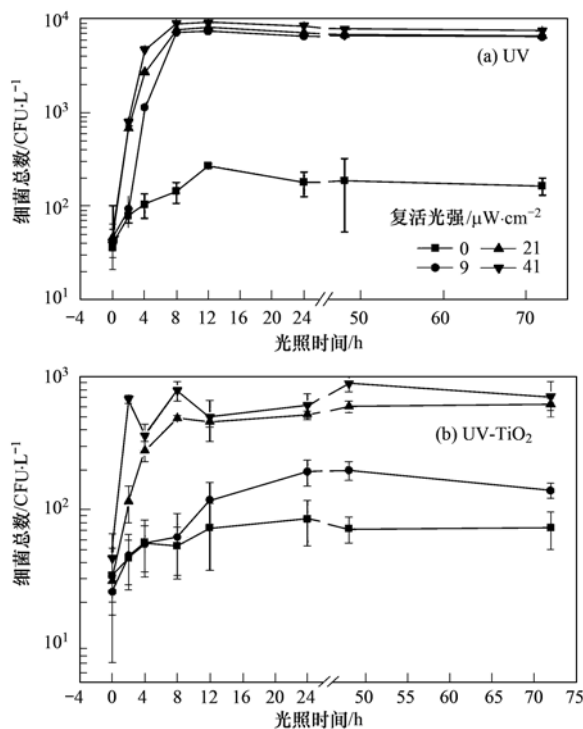


图3 不同消毒条件下复活光强对大肠杆菌光复活的影响

Fig. 3 Effects of disinfection method and light intensity on photoreactivation of *E. coli*

从图3可以看出,水样分别经单纯UV消毒和UV-TiO₂光催化消毒后,大肠杆菌的光复活能力表现不同.经UV-TiO₂消毒后大肠杆菌光复活能力明显下降.复活光强度不同,其复活能力也不同.在单纯UV消毒条件下,出水在9、21和 $41\text{ }\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 复活光强下均发生明显的光复活,且复活光强越高,复活速度越快.主要原因是在较强复活光强度下,细菌恢复受损细胞结构所接受的能量越高,从而光复活速度也越快^[18,19].此现象表明,对于较小的细胞结构损伤,大肠杆菌可以利用较弱的光能完成复活过程,此结论与相关的研究类似^[20,21].而在UV-TiO₂光催化消毒时,不同复活光强时大肠杆菌的光复活率则明显不同.从图3(b)中可见,在0和 $9\text{ }\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 等较低的复活光强照射后,经 $20\text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ UV-TiO₂消毒后水样中细菌总量变化不大,在经历最初12 h照射后,水中细菌总数仍处于平衡状态,可能的原因是UV-TiO₂光催化消毒对细菌细胞结构损伤较大,低复活光强照射下受损细胞很难恢复,而部分受损较小的大肠杆菌在低照射条件下也需要经历较长的恢复期,经72 h照射后,大肠杆菌总数仍能满足一级A标排放标准.只有在 $41\text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的

强复活光照射下, 受损细胞在高能量补充下快速恢复, 大肠杆菌才会出现较强的光复活情况, 说明 UV-TiO₂ 光催化消毒对大肠杆菌灭活效果高于单纯的 UV 消毒。

不同消毒方法对大肠杆菌的光复活速度影响也不同。从图 3 可见, 单纯 UV 消毒时, 在接触复活光的前 12 h 内, 细菌在 9、21 和 41 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 复活光强下的复活速率相差无几。而经 20 $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ UV-TiO₂ 光催化消毒后的水样, 在 0 和 9 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 等较低复合光照射下, 在复活光照射的前 12 h 内, 大肠杆菌的光复活速率较低, 只有在 21 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 及其以上等较高的复活光强下大肠杆菌才出现较强的光复活速率。

2.3 复活光强对粪肠球菌光复活的影响

将含有粪肠球菌的水样分别放置于 20 $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 单纯 UV 和 UV-TiO₂ 联合条件下进行消毒, 消毒后水样的光复活试验结果如 4 所示。

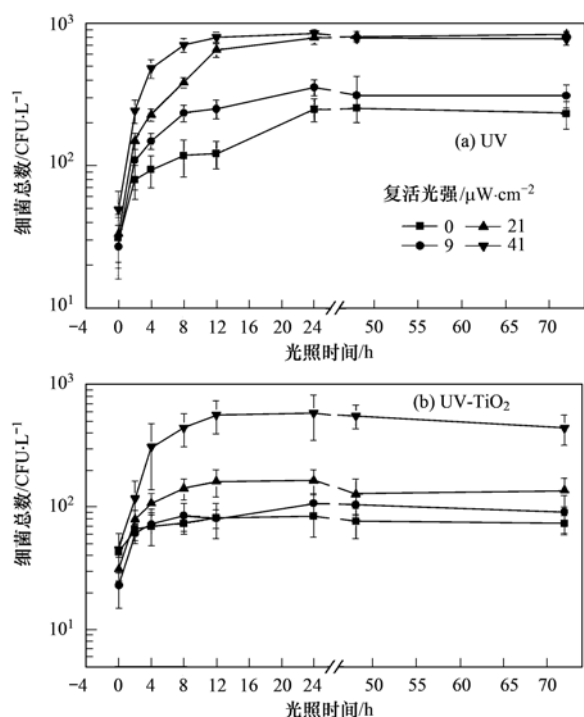


图 4 不同消毒条件下复活光强对粪肠球菌光复活的影响

Fig. 4 Effects of disinfection method and light intensity on photoreactivation of *E. faecalis*

从图 4 可以看出, 水样中粪肠球菌的光复活状况与大肠杆菌的光复活情况类似, 在复活光照射下均有不同程度的复活现象。所不同的是, 粪肠球菌对紫外光的消毒耐受力比大肠杆菌要高。在单纯 UV 消毒时, 粪肠球菌在较低的甚至强度为 0 的复活光条件下, 12 h 后其也产生了较明显的光复活现象。在 0、9、21 和 41 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的照射强度下, 粪肠

球菌 2 h 照射后平均光复活速率分别为 21、41、58 和 98 $\text{CFU}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$, 说明粪肠球菌的复活速率随着复活光强度的增加而增大。

而在 UV-TiO₂ 消毒条件下粪肠球菌的光复活速率则明显不同。在羟基自由基 ($\cdot\text{OH}$) 与紫外线的共同作用下, 粪肠球菌的光复活速率远小于单纯紫外光消毒的光复活速率。如图 4(b) 所示, 在 0、9 和 21 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 等低剂量的复活光照射下, 粪肠球菌几乎没有发生光复活, 只有当光照强度增加到 41 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 以后, 粪肠球菌才产生较低程度的复活。在复活光照射过程中, 粪肠球菌浓度最高点发生在 8~24 h 之间, 最高浓度为 580 $\text{CFU}\cdot\text{L}^{-1}$, 最大复活速率为 65 $\text{CFU}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$, 复活速率远低于单纯 UV 消毒时的速率, 这也说明 UV-TiO₂ 光催化消毒的效率远高于单纯的 UV 消毒。

2.4 两种不同细菌在 UV-TiO₂ 联合作用下消毒效果的比较

从以上试验结果可以看出, 大肠杆菌和粪肠球菌这两种细菌对 UV-TiO₂ 光催化消毒的敏感性有较大差别, 大肠杆菌对 UV-TiO₂ 光催化消毒的抵抗性较强, 其光复活不存在阈值, 在较低的复活光强度下即可产生一定的光复活现象, 复活光强度越高, 大肠杆菌的光复活率越高, 显示出大肠杆菌有较强的光复活能力^[16,22,23]。但 UV-TiO₂ 消毒对大肠杆菌的灭活能力显著, 经该法消毒后即使在 41 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的强复活光照射 72 h 后, 水中大肠杆菌总数仍低于国家标准的限值, 表明 UV-TiO₂ 光催化联合消毒的强大消毒能力^[24,25]。

而粪肠球菌对 UV-TiO₂ 消毒的耐受力较弱, 经 UV-TiO₂ 消毒后粪肠球菌的复活存在一个明显的阈值^[20,26], 只有在复活光强度达到 41 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时才会产生较明显的光复活, 且复活率较低, 而低于此阈值的复活光对粪肠球菌不会产生明显的光复活现象。

从以上试验结果可以看出, UV-TiO₂ 光催化消毒对不同菌种的损伤程度不同, 其灭菌机制及消毒后细菌的光复活机制仍有待进一步深入研究, 但是其强大的消毒效率以及对细菌光复活能力的抑制效果是不容忽视的, UV-TiO₂ 光催化联合消毒技术值得大力推广应用。

3 结论

(1) 相比单纯紫外光消毒, UV-TiO₂ 联合的消毒效率要远高于单纯的 UV 消毒。采用 UV-TiO₂ 光催化消毒, 即使在 5 $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的低紫外光照射剂量下, 也

可使排放水中的大肠杆菌灭活达到排放标准的要求。

(2)不同消毒方法对再生水中大肠杆菌的光复活影响不同。经单纯 UV 消毒后大肠杆菌对复活光的敏感性较弱,在较低复活光的照射下大肠杆菌也会出现较强的光复活情况。而经 UV-TiO₂ 联合消毒后,大肠杆菌只有在较强的复活光照射下才会产生一定的光复活现象,且总的复活率较低,出水在 41 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 强度下经 72 h 照射后大肠杆菌总数仍低于国家标准的限值。

(3) UV-TiO₂ 消毒对粪肠球菌的光复活抑制现象明显,在低复活光的照射下粪肠球菌几乎不发生复活现象,只有在较强的复活光照射下才会产生一定的光复活,说明 UV-TiO₂ 对粪肠球菌的消毒效率强大。

参考文献:

- [1] Rajala-Mustonen R L, Toivola P S, Heinonen-Tanski H, *et al.* Effects of peracetic acid and UV irradiation on the inactivation of coliphages in wastewater [J]. Water Science and Technology, 1997, **35**(11): 237-241.
- [2] Nebot S E, Salcedo I, Rade J A, *et al.* Modelling of reactivation after UV disinfection; effect of UV-C dose on subsequent photoreactivation and dark repair [J]. Water Research, 2007, **41**(14): 3141-3151.
- [3] Sakai H, Oguma K, Katayama H, *et al.* Effects of low or medium-pressure UV irradiation on the release of intracellular microcystin [J]. Water Research, 2007, **41**(15): 3458-3464.
- [4] Mills A, Le Hunte S. An overview of semiconductor photocatalysis [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 1997, **108**(1): 1-35.
- [5] Thomson T L, Yates J T. Surface science studies of the photoactivation of TiO₂-New photochemical processes [J]. Chemical Reviews, 2006, **106**(10): 4428-4453.
- [6] Tadashi M, Ryozi T, Toshiaki N. Photoelectrochemical sterilization of microbial cells by semiconductor powders [J]. FEMS Microbiology Letters, 1995, **29**(11): 211-214.
- [7] Liberti L, Lopez A, Notarnicola M, *et al.* Comparison of advanced disinfecting methods for municipal wastewater reuse in agriculture [J]. Water Science & Technology, 2000, **42**(1-2): 215-220.
- [8] Kikuchi Y, Sunada K, Iyoda T, *et al.* Photocatalytic bactericidal effect of TiO₂ thin film; dynamic view of the active oxygen species responsible for the effect [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 1997, **106**(1): 51-56.
- [9] Sunada K, Watanabe T, Hashimoto K. Studies on photokilling of bacteria on TiO₂ thin film [J]. Journal of Photochemistry & Photobiology A: Chemistry, 2003, **156**(1-3): 227-233.
- [10] Bolton J R, Linden K G. Standardization of methods for fluence (UV Dose) determination in bench-scale UV experiments [J]. Journal of Environmental Engineering, 2003, **129**(3): 209-216.
- [11] 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. 15-80.
- [12] Fariborz T. Ultraviolet and ionizing radiation for microorganism inactivation [J]. Water Research, 2004, **38**(6): 3940-3948.
- [13] Van Aken B, Lin L S. Effect of the disinfection agents chlorine, UV irradiation, silver ions, and TiO₂ nanoparticles/near-UV on DNA molecules [J]. Water Science and Technology, 2011, **64**(6): 1226-1232.
- [14] 马晓敏, 王怡中. 二氧化钛光催化氧化杀菌的研究及进展 [J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, **3**(5): 15-19.
- [15] Ireland J C, Klostermann P, Rice E W, *et al.* Inactivation of *Escherichia coli* by titanium dioxide photocatalytic oxidation [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1993, **59**(5): 1668-1670.
- [16] Lin C H, Yu R F, Cheng W P, *et al.* Monitoring and control of UV and UV-TiO₂ disinfections for municipal wastewater reclamation using artificial neural networks [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **209-210**: 348-354.
- [17] Rahmani A, Samarghandi M R, Samadi M T, *et al.* Photocatalytic disinfection of *Coliform bacteria* using UV/TiO₂ [J]. Journal of Research in Health Sciences, 2009, **9**(1): 1-6.
- [18] Ede S, Hafner L, Dunlop P, *et al.* Photocatalytic disinfection of bacterial pollutants using suspended and immobilized TiO₂ powders [J]. Photochemistry and Photobiology, 2012, **88**(3): 728-735.
- [19] Nath R K, Zain M F M, Kadhun A A H. Photocatalysis-A novel approach for solving various environmental and disinfection problems: a brief review [J]. Journal of Applied Sciences Research, 2012, **8**(8): 4147-4155.
- [20] 郭美婷, 胡洪营, 刘文君. 复活光照强度对再生水紫外线消毒后大肠杆菌和粪大肠杆菌光复活的影响 [J]. 环境科学, 2008, **29**(9): 2576-2579.
- [21] Oguma K, Katayama H, Ohgaki S. Photoreactivation of *Escherichia coli* after low-or medium-pressure UV disinfection determined by an endonuclease sensitive site assay [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2002, **68**(12): 6029-6035.
- [22] Jin X, Li Z F, Zhao X, *et al.* Effect of ultrasound pre-treatment on ultraviolet disinfection in controlling bacterial photoreactivation [J]. Advanced Materials Research, 2011, **347-353**: 2369-2374.
- [23] Shang C, Cheung L M, Ho C M, *et al.* Repression of photoreactivation and dark repair of *Coliform bacteria* by TiO₂-modified UV-C disinfection [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2009, **89**(3-4): 536-542.
- [24] Locas A, Demers J, Payment P. Evaluation of photoreactivation of *Escherichia coli* and *Enterococci* after UV disinfection of municipal wastewater [J]. Canadian Journal of Microbiology, 2008, **54**(11): 971-975.
- [25] Mounaouer B, Saidi N, Abdennaceur H. UV disinfection of secondary wastewater: influence of photoreactivation on the Kinetics of inactivation of *Pseudomonas aeruginosa* [J]. Current Biotechnology, 2012, **1**(4): 346-357.
- [26] Choi Y S, Kim B W. Photocatalytic disinfection of *E. coli* in a UV/TiO₂-immobilised optical-fibre reactor [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2000, **75**(12): 1145-1150.

CONTENTS

Analysis of Characteristics of Black Carbon Concentration in Shanghai from 2008 to 2012	WANG Hong-qiang, HE Qian-shan, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (1215)
Chemical Characteristics and Insoluble Particulates' Surface Morphology of a Snowfall Process in the Southeastern Suburb of Urumqi	LU Hui, WEI Wen-shou, CUI Cai-xia, <i>et al.</i> (1223)
Comparative Study of the Level and Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers and New Brominated Flame Retardants in the Atmosphere of Typical Urban	WU Hui, JIN Jun, WANG Ying, <i>et al.</i> (1230)
Source and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Ambient Air PM ₁₀ from One Coking Plant	DONG Ting, LI Tian-xin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1238)
Estimation of Average Traffic Emission Factor Based on Synchronized Incremental Traffic Flow and Air Pollutant Concentration	LI Run-kui, ZHAO Tong, LI Zhi-peng, <i>et al.</i> (1245)
Study on Critical Loads of Sulfur and Nitrogen in the Pearl River Delta	SUN Cheng-ling, XIE Shao-dong (1250)
Hydrogen Sulfide Removal by the Combination of Non-Thermal Plasma and Biological Process	LI Hua-qin, HE Jue-cong, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (1256)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Atrazine in Taizi River Basin, China	ZHENG Lei, ZHANG Yi-zhang, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1263)
Development of a Method for Measuring Dissolved Reactive Phosphorus (DRP) and Dissolved Ferrous Iron in Large Batch in Pore Water Samples of Sediments with Micro-volumes	WANG Yan, ZHU Chun-gang, XU Di, <i>et al.</i> (1271)
Temporal and Spatial Variation of Water Nutrient Level After Exogenous Nutrient Input	FU Ling, ZHAO Kai, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (1278)
Physical Process Based Risk Assessment of Groundwater Pollution in the Mining Area	SUN Fa-sheng, CHENG Pin, ZHANG Bo (1285)
Hydrogeochemical Characteristics of a Typical Karst Groundwater System in Chongqing	YANG Ping-heng, LU Bing-qing, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (1290)
Investigation of Nitrogen, Phosphorus and Microbial Contamination in Laolongdong Underground River System of Chongqing	LAN Jia-cheng, YANG Ping-heng, REN Kun, <i>et al.</i> (1297)
Effects on Phosphorus Fraction Distribution in Sediment by Roots of <i>Vallisneria natans</i>	LI Zhen-guo, WANG Guo-xiang, ZHANG Jia, <i>et al.</i> (1304)
Modeling Nitrogen Transformation in a Novel Circular-Flow Corridor Wetland	PENG Jian-feng, SONG Yong-hui, YUAN Peng, <i>et al.</i> (1311)
Natural Attenuation of Tetracycline in the Water of Taihu Lake Under Different Environmental Conditions	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, JI Ying-xue, <i>et al.</i> (1318)
Inactivation and Reactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria During and After UV Disinfection in Reclaimed Water	HUANG Jing-jing, TANG Fang, XI Jin-ying, <i>et al.</i> (1326)
Photoreactivation of <i>Escherichia coli</i> and <i>Enterococcus faecalis</i> in the Secondary Effluent Disinfected by UV-TiO ₂	WANG Xi-feng, GONG Xin, HU Xiao-lian, <i>et al.</i> (1332)
Stability of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, SHEN Bing-bing, JING Jie, <i>et al.</i> (1337)
Fouling Behavior of Sodium Alginate During Microfiltration at Various Ionic Compositions; XDLVO Approach	ZHAO Ying-xu, ZONG Rui-qiang, GAO Xin-yu, <i>et al.</i> (1343)
Enhanced Remediation of 4-Chloronitrobenzene Contaminated Groundwater with Nanoscale Zero-valence Iron (nZVI) Catalyzed Hydrogen Peroxide (H ₂ O ₂)	FU Rong-bing (1351)
Effect of the Coexistence of Chlorobenzene Homologue on Anaerobic Degradation of Hexachlorobenzene	WANG Qi, LIU Hui, JIANG Lin, <i>et al.</i> (1358)
Research on Removal Efficiency of Cd(II)-bearing Wastewater by Sulfate-reducing Biological Filter	WU Xuan, TAN Ke-yan, HU Xi-jia, <i>et al.</i> (1366)
Control Strategies of Nitrogen Removal Process in a Pilot Test of the Southern WWTP Based on the Nitrogen Balance	JIANG Ying-he, LIU Pei-ju, WANG Lei, <i>et al.</i> (1372)
Effect of Simulated Inorganic Anion Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	CHEN Yan, HUANG Fang, XIE Xin-yuan (1377)
Microbial Reduction of Cu ²⁺ Mediated by Electroactive Biofilms	LIU Yi, ZHOU Shun-gui, YUAN Yong, <i>et al.</i> (1384)
Copper Recovery from Artificial Bioleaching Lixivium of Waste Printed Circuit Boards	CHENG Dan, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1391)
Difference of Contaminant Composition Between Landfill Leachates and Groundwater and Its Reasons	HE Xiao-song, YU Hong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1399)
Photochemical Degradation of Landfill Leachate Facilitated by Combined Schwertmannite and H ₂ O ₂	WANG He-ru, SONG Yong-wei, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (1407)
Effects of Operating Parameters on Organic Toxicity of Sludge Treating Synthetic Bisphenol A Wastewater	YANG Na, CHEN Xiu-rong, LIN Feng-kai, <i>et al.</i> (1414)
Comparative Study on Biological Methane Potential and Methanogen Biodiversity in the Anaerobic Digestion of Excess Sludge	DONG Hui-yu, JI Min (1421)
Isolation and Identification of Mn Oxidizing Bacterium <i>Aminobacter</i> sp. H1 and Its Oxidation Mechanism	YAN Ping, JIANG Li-ying, CHEN Jian-meng, <i>et al.</i> (1428)
Nitrate Removal by a Strain of Nitrate-Dependent Fe(II)-Oxidizing Bacteria	WANG Hong-yu, YANG Kai, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (1437)
Study on the Iopromide-Degrading Characteristics of Strain <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 via Co-Metabolism	XU Bing-jie, GAO Pin, XUE Gang, <i>et al.</i> (1443)
Using Flow Cytometry to Explore the Changes of <i>Sphingomonas</i> sp. GY2B Bacterial Surface Characteristics in the Process of Degrading Phenanthrene	ZHANG Meng-lu, DANG Zhi, WU Feng-ji, <i>et al.</i> (1449)
Research on Characteristic of Interrelationship Between Toxic Organic Compound BPA and <i>Chlorella vulgaris</i>	CHEN Shan-jia, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i> (1457)
Effect of Magnesium Deficiency on Photosynthetic Physiology and Triacylglyceride (TAG) Accumulation of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Shan, ZHAO Shu-xin, WEI Chang-long, <i>et al.</i> (1462)
Effects of Microcystins on Growth and Antioxidant System of Rice Roots	WANG Wei-min, DENG Yu, ZOU Hua, <i>et al.</i> (1468)
Responses of Soybean Cultivar Dongsheng-1 to Different O ₃ Concentrations in Northeast China	ZHANG Wei-wei, WANG Guang-hua, WANG Mei-yu, <i>et al.</i> (1473)
Development and Succession of Biological Soil Crusts and the Changes of Microbial Biomasses	WU Li, ZHANG Gao-ke, CHEN Xiao-guo, <i>et al.</i> (1479)
Effects of Lead on the Growth and Reproduction of <i>Eisenia fetida</i> with Aged Soils	CHEN Li-hong, LIU Zheng-tao, FANG Zheng, <i>et al.</i> (1486)
Soil Heavy Metal Cadmium Standard Limit and Range of Background Value Research	ZHAO Xiao-jun, LI Si-jin, XU Ren-ji, <i>et al.</i> (1491)
Study on Soil Element Background Values of the Hoh Xil Area in North Tibet	BAI Jian-kun, WANG Jian-li, LI Chao-liu, <i>et al.</i> (1498)
Transfer Characteristic and Source Identification of Soil Heavy Metals from Water-Level-Fluctuating Zone Along Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir Area	XU Tao, WANG Fei, GUO Qiang, <i>et al.</i> (1502)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Analysis for Soil Around Haining Electroplating Industrial Park	LI Jiong-hui, WENG Shan, FANG Jing, <i>et al.</i> (1509)
Sources and Spatial Distribution of Typical Heavy Metal Pollutants in Soils in Xihu Scenic Area	ZHANG Hai-zhen, TANG Yu-li, LU Jun, <i>et al.</i> (1516)
Distribution and Assessment of Mercury in the Ambient Soil of a Municipal Solid Waste Incinerator	XIE Hui-ting, ZHANG Cheng-zhong, XU Feng, <i>et al.</i> (1523)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Soils and Sediments Surrounding Dishui Lake in Shanghai	ZHUGE Xiang-zhen, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1531)
Impact of SDBS/Na ⁺ on Red Soil Colloidal Stability	TANG Ying, LI Hang, ZHU Hua-ling, <i>et al.</i> (1540)
Effects of Stabilization Treatment on Migration and Transformation of Heavy Metals in Mineral Waste Residues	ZHAO Shu-hua, CHEN Zhi-liang, ZHANG Tai-ping, <i>et al.</i> (1548)
Study on a New Method of Fast Monitoring Toxicity of Cd ²⁺ by Algal in Water	DUAN Jing-bo, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, <i>et al.</i> (1555)
Immunosensor for Rapid Detection of 1,3-Dinitrobenzene	LONG Feng, SHI Han-chang, WANG Hong-chen, <i>et al.</i> (1561)
Mg/Al Layered Double Hydroxides Prepared by Microwave-Assisted Co-Precipitation Method for the Removal of Bromate	ZHONG Qiong, LI Huan (1566)
Discussion on Several Key Points of Decision Support System for Remediation of Contaminated Sites	LIAO Xiao-yong, TAO Huan, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (1576)
A Review of Multi-Scale Studies on Spatial Variation of the Lead (Pb) Concentration in Urban Soils	YANG Meng, LI Feng-ying, DIAO Yi-wei, <i>et al.</i> (1586)
Review on Characteristics and Detecting Assay of Bacterial Endotoxin Contamination in Water Environment	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (1597)
Advances in Molecular Mechanism of Bacterial Reduction of Hexavalent Chromium	LI Dou, ZHAO You-cai, SONG Li-yan, <i>et al.</i> (1602)
Anaerobic Membrane Bioreactors for Treating Agricultural and Food Processing Wastewater at High Strength	WEI Yuan-song, YU Da-wei, CAO Lei (1613)

《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)

2014年4月15日 35卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 4 Apr. 15, 2014

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