

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, 崔骁勇, 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, 刘晓冰, 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)	

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^{1,3}, 汤芳¹, 席劲瑛¹, 庞宇辰¹, 胡洪营^{1,2*}

(1. 清华大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家联合重点实验室, 北京 100084; 2. 清华大学深圳研究生院, 国家环境保护微生物利用与安全控制重点实验室, 深圳 518055; 3. 中国电力工程顾问集团公司, 北京 100120)

摘要: 抗生素抗性菌作为再生水中的新兴污染物而受到广泛关注. 为探明紫外线对抗生素抗性菌的灭活和消毒后抗性菌的复活潜能, 研究了以城市污水为水源的再生水(简称“再生水”)中青霉素抗性菌、氨苄青霉素抗性菌、头孢氨苄抗性菌、氯霉素抗性菌和利福平抗性菌的紫外线灭活特性, 并考察了再生水中的抗生素抗性菌在黑暗条件下的复活潜能. 结果表明, 20 $\text{mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ 紫外线消毒剂量下, 实际再生水中青霉素抗性菌、氨苄青霉素抗性菌、头孢氨苄抗性菌和氯霉素抗性菌的灭活率均高于 4-log, 与总异养菌群灭活率相当, 而利福平抗性菌的灭活率(3.7-log)略低于总异养菌群. 紫外线消毒后, 再生水静置 22 h 后, 抗生素抗性菌普遍出现复活现象, 当紫外线消毒剂量为常规剂量 20 $\text{mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, 消毒后再生水中的抗生素抗性菌菌落形成能力高达 3-log. 因此, 常规的紫外线消毒剂量不能有效控制再生水储存或运输过程中抗生素抗性菌的复活.

关键词: 抗生素抗性菌; 紫外线消毒; 紫外线灭活; 复活特性; 再生水处理

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)04-1326-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.04.017

Inactivation and Reactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria During and After UV Disinfection in Reclaimed Water

HUANG Jing-jing^{1,3}, TANG Fang¹, XI Jin-ying¹, PANG Yu-chen¹, HU Hong-ying^{1,2}

(1. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Microorganism Application and Risk Control (MARC), Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China; 3. China Power Engineering Consulting Group Corporation, Beijing 100120, China)

Abstract: Prevalence of antibiotic-resistant bacteria in wastewater effluents is concerned as an emerging contaminant. To estimate inactivation and reactivation potentials of antibiotic-resistant bacteria by UV disinfection, inactivation and reactivation of penicillin-, ampicillin-, cephalexin-, chloramphenicol- and rifampicin-resistant bacteria in the secondary effluent were studied under different UV doses. The results showed that the inactivation ratios of penicillin-, ampicillin-, cephalexin- and chloramphenicol-resistant bacteria were higher than 4-log, which was closed to that of total heterotrophic bacteria; however, the inactivation ratio of rifampicin-resistant bacteria was lower (3.7-log) under 20 $\text{mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ UV exposure. After 22 h standing incubation, antibiotic-resistant bacteria widely reactivated. The colony forming ability of antibiotic-resistant bacteria was as high as 3-log when exposed to 20 $\text{mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ UV light. Hence, conventional UV dose can not effectively control reactivation of antibiotic-resistant bacteria in reclaimed water by UV disinfection.

Key words: antibiotic-resistant bacteria; UV disinfection; inactivation; reactivation; reclaimed water treatment

再生水可应用于市政杂用、景观回用、娱乐用水等方面, 在城市水循环体系中扮演着越来越重要的角色^[1]. 以城市污水为水源的再生水中存在着多种水生病原微生物, 在再生水利用过程中存在微生物安全风险^[2-5]. 消毒是控制再生水中病原微生物的必要措施之一.

前期的研究表明, 城市污水处理厂二级出水中抗生素抗性菌浓度较高, 且这些抗性菌能在再生水中较长时间内稳定存在^[6]. 再生水中抗生素抗性菌的传播可能引起健康风险, 因此有必要利用消毒对再生水中抗生素抗性菌进行控制. 抗生素抗性菌相关的消毒研究可追溯至 20 世纪 70 年代. 一些

研究表明, 氯消毒、紫外线消毒均会改变二级出水或饮用水中的抗生素抗性菌比例, 而过氧乙酸消毒会改变二级出水中抗性菌所携带质粒的分布^[7-12]. 但国内外对于各种消毒方法对抗生素抗性菌的灭活特性研究较少. 紫外线消毒是最常用的污水消毒工艺之一, 由于紫外线同时具有灭菌效果好、消毒副产物生成少而在污水消毒领域里应用广泛.

本研究主要探讨不同紫外线消毒剂量下实际再

收稿日期: 2013-08-08; 修订日期: 2013-09-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078209)

作者简介: 黄晶晶(1985~), 女, 工程师, 主要研究方向为非常规水资源再生处理与利用, E-mail: jjhuang@cpecc.net

* 通讯联系人, E-mail: hyhu@tsinghua.edu.cn

生水中抗生素抗性菌灭活特性,以及基于抗生素抗性菌灭活率达标的紫外线消毒剂量,在此基础上,针对实际再生水中的抗生素抗性菌在黑暗条件下的复活特征,考察抗生素抗性菌的复活潜能,基于复活率进一步提出紫外线消毒的实际灭活率,以期为再生水储存和输配提供基础数据支撑。

1 材料与方法

1.1 水样

取自北京市一座实际运行的城市污水处理厂(WWTP-X)的二级出水作为再生水水样。取样时段为2010年4月~2011年6月。该城市污水处理厂的主要处理工艺包括一级沉淀池、A/A/O生化处理系统和二级沉淀池。取样设备均经过消毒处理,样品

保存于冰盒运回实验室,保存于4℃冰箱,在4 h内进行抗生素抗性菌及相关水质指标测定工作。水样相关的水质参数见表1。

1.2 紫外线消毒试验与灭活评价方法

1.2.1 紫外线消毒试验

紫外线消毒试验在实验室自主设计的紫外线平行光束仪装置内进行。平行光束仪内装有1根40 W低压紫外灯管,灯管水平中心线距离试验水样表面40 cm^[13]。用分光光度计(型号UV-2401PC)测定试验水样在254 nm下的吸光度(cm⁻¹),根据紫外线消毒试验中平均光强计算确定水样实际接受的平均光强^[14]。本试验中,所用紫外装置的平均光强为0.034 mW·cm⁻²。紫外线剂量为水样接受的平均光强与照射时间的乘积。

表1 消毒用水样的水质参数

Table 1 Water quality of reclaimed water sample used in UV disinfection				
pH	COD/mg·L ⁻¹	TOC/mg·L ⁻¹	UV ₂₅₄ /cm ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹
8.0~8.1	82.0~110.7	9.0~15.9	0.14~0.21	8.8

取15 mL水样于携带磁力转子的直径60 mm的灭菌培养皿中,取下培养皿盖,并将培养皿置于平行光束仪正下方,启动搅拌器,使水样混合15 s后,打开遮光板,使得水样接受一定时间的紫外线照射^[14]。消毒试验结束后迅速合上遮光板,并取出培养皿。紫外线消毒试验在常温下(25℃±2℃)进行。

1.2.2 灭活评价方法

采用对数灭活率表征紫外线消毒对水样中总异养菌群和抗生素抗性菌的灭活效率,计算方法如下式:

灭活率 = lg(N₀/N_i)

式中,N₀:紫外线照射前的细菌数(CFU·mL⁻¹),N_i:紫外线照射后水样中的细菌数(CFU·mL⁻¹)。

1.3 复活试验与评价方法

1.3.1 复活试验

将紫外线消毒后的水样置于黑暗常温(25℃±2℃)下,经过22 h后测定水样中的总异养菌群和各抗生素抗性菌。

1.3.2 复活潜力评价方法

为了评价消毒后水样中总异养菌群和抗生素抗性菌的复活程度,文献中光复活率的评价方法,将之拓宽为复活百分比。复活百分比(PR)反映了消毒后灭活细菌中被修复细菌的比例^[15,16],其计算公式如

式(1)所示。

PR = (N_r - N_i)/(N₀ - N_i) × 100% (1)

同时,利用水样中细菌的菌落形成能力(colony forming ability,CFA)来评价再生水中总异养菌群和抗生素抗性菌的复活潜能,以比较不同初始浓度下各类细菌的复活潜能的差别,其计算公式如式(2)所示。

lg(N_r/N_i) = lg(N_r/N₀) - lg(N_i/N₀) (2)

式中,N₀:紫外线照射前的细菌数(CFU·mL⁻¹),N_i:紫外线照射后水样中的细菌数(CFU·mL⁻¹),N_r:复活试验后水样中的细菌数(CFU·mL⁻¹)。

1.4 微生物检测方法

1.4.1 总异养菌群测定

采用营养琼脂培养基平板法测定污水中的总异养菌群数^[17]。在培养皿(Φ90 mm)中加入1 mL磷酸缓冲盐溶液(phosphate buffered saline,PBS)10倍梯度稀释水样,加入10 mL的营养琼脂培养基,摇匀凝固后,倒置放于37℃培养箱内培养24 h,计所有菌落数,用单位体积水样的菌落形成单位(CFU·mL⁻¹)表示。检出限为1 CFU·mL⁻¹,每次测定设3个平行样。

1.4.2 抗生素抗性菌测定

采用含一定浓度抗生素的营养琼脂培养基平板法测定污水中的各类抗生素抗性菌^[18]。在培养皿

($\Phi 90$ mm)中加入 1 mL PBS 10 倍梯度稀释水样,加入一定量的抗生素溶液,加入 10 mL 的营养琼脂培养基,使培养皿体系中抗生素达到一定浓度,摇匀凝固后,倒置放于 37℃ 培养箱内培养 24 h,计菌落数,用单位体积水样的菌落形成单位($\text{CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$)表

示.检出限为 $1\text{ CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$,每次测定设 3 个平行样.测定体系的抗生素浓度采用 CLSI (clinical and laboratory standards institute,美国临床与实验室标准协会)药敏试验标准中病原菌抗性界定浓度的最大值,如表 2 所示^[19].

表 2 抗生素抗性菌检测用抗生素浓度

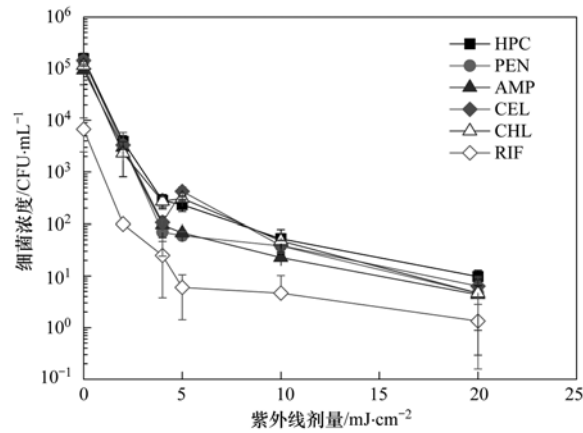
Table 2 Concentrations of antibiotics used in antibiotic-resistant bacteria detection					
抗生素	青霉素 (PEN)	氨苄青霉素 (AMP)	头孢氨苄 (CEL)	氯霉素 (CHL)	利福平 (RIF)
抗生素浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	16	32	32	32	4

2 结果与分析

2.1 紫外线消毒对抗生素抗性菌的灭活

2.1.1 抗生素抗性菌的灭活特性

紫外线对再生水中各类抗生素抗性菌灭活效率的差异可能导致增大或降低抗生素抗性菌在再生水中存活的可能性.不同紫外线消毒剂量下,水样中青霉素抗性菌、氨苄青霉素抗性菌、头孢氨苄抗性菌、氯霉素抗性菌和利福平抗性菌的剂量响应曲线如图 1 所示,灭活曲线如图 2 所示.



HPC:总异养菌群;PEN:青霉素抗性菌;
AMP:氨苄青霉素抗性菌;CEL:头孢氨苄抗性菌;
CHL:氯霉素抗性菌;RIF:利福平抗性菌,下同

图 1 不同紫外线消毒剂量下抗生素抗性菌的剂量响应曲线
Fig. 1 Response curves of antibiotic-resistant bacteria under series of UV exposures

水样中总异养菌群、青霉素抗性菌、氨苄青霉素抗性菌、头孢氨苄抗性菌、氯霉素抗性菌和利福平抗性菌的浓度范围分别为 $1.1\times 10^5\sim 1.9\times 10^5$ 、 $1.3\times 10^5\sim 1.6\times 10^5$ 、 $4.3\times 10^4\sim 1.3\times 10^5$ 、 $1.2\times 10^5\sim 1.6\times 10^5$ 、 $7.8\times 10^4\sim 1.4\times 10^5$ 和 $2.8\times 10^3\sim 1.1\times 10^4\text{ CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$,其中青霉素抗性菌、氨苄青霉素抗性菌、先锋霉素抗性菌和氯霉素抗性菌的浓度

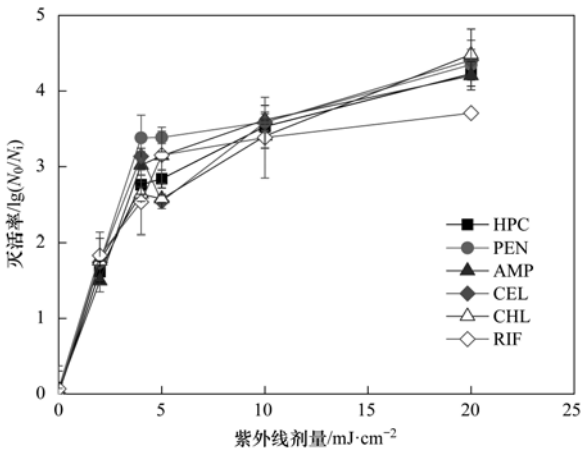


图 2 不同紫外线消毒剂量下抗生素抗性菌的灭活曲线
Fig. 2 Inactivation curves of antibiotic-resistant bacteria under series of UV exposures

显著高于利福平抗性菌浓度 (One-way ANOVA, $P < 0.05$).

从灭活曲线来看,青霉素抗性菌、氨苄青霉素抗性菌、头孢氨苄抗性菌和氯霉素抗性菌的灭活曲线接近于总异养菌群的灭活曲线.当再生水暴露于 $4\text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 紫外线剂量时,青霉素抗性菌和头孢氨苄抗性菌的灭活率分别达到 3.38-log 和 3.13-log,显著高于总异养菌群的灭活率 (2.76-log) (One-way ANOVA, $P < 0.05$);然而,在其余紫外线暴露剂量下,青霉素抗性菌和头孢氨苄抗性菌灭活率与总异养菌群无显著性差别.利福平抗性菌的灭活率与总异养菌群无显著性差别.当紫外线剂量达到 $20\text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时,再生水中的青霉素抗性菌、氨苄青霉素抗性菌、头孢氨苄抗性菌和氯霉素抗性菌的灭活率均高于 4-log,与总异养菌群的灭活率相当,而利福平抗性菌的灭活率为 3.7-log,稍低于总异养菌群.

以上研究结果表明,再生水中此 5 类抗生素抗性菌对紫外线的响应与总异养菌群类似,并没有显著表现出对紫外线的耐受性或敏感性.这一结果与

文献[20]的结论——紫外线消毒对抗生素敏感大肠杆菌与氨苄青霉素抗性大肠杆菌的灭活无显著差别类似。

2.1.2 紫外线消毒后抗生素抗性菌比例的变化

紫外线消毒后水样中抗生素抗性菌的比例变化如图 3 所示。从中可知,经过紫外线消毒后,青霉素抗性菌、氨苄青霉素抗性菌和头孢氨苄抗性菌的比例较其各自的初始比例低;而氯霉素抗性菌和利福平抗性菌的比例变化不大。经紫外线消毒后,利福平抗性菌比例升高;暴露于 $20 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ 紫外线照射后,利福平抗性菌比例由初始的 4.33% 升高至 13.79%。这一结果表明,紫外线消毒对利福平抗性菌可能存在选择作用。

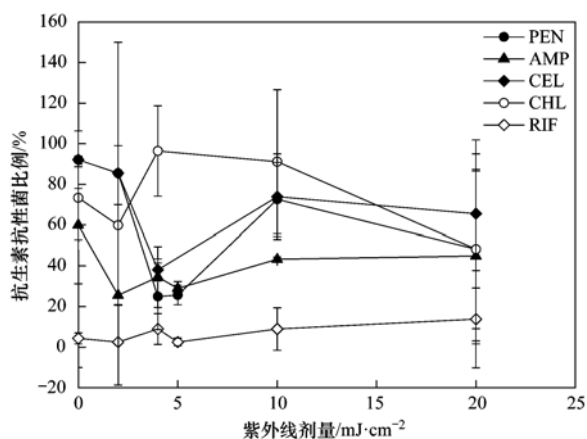


图 3 紫外线消毒后水样中抗生素抗性菌在总异养菌群中的比例变化

Fig. 3 Proportions of antibiotic-resistant bacteria after UV disinfection

2.2 紫外线消毒后抗生素抗性菌的复活

研究表明,紫外线消毒灭活的细菌能够通过自身体内的酶激活与反应在光照或黑暗条件下进行自我修复^[15,21]。由于紫外线没有持续的消毒能力,当经过紫外线消毒后的再生水储存于水箱或输送水管中时,细菌会出现复活或再生长的现象。一般来讲,再生水储存于水箱或管道中的时间从几小时到几天不等。因此,本研究选取了 22 h 作为抗性菌在黑暗条件下的修复时间。

在再生水储存过程中,水中增加的细菌数可能包括活细菌的繁殖再生长和灭活的细菌的复活及其繁殖再生长。前期研究结果表明,二级出水静置 22 h 后,总异养菌群和抗生素抗性菌均无显著性生长,说明其中的碳、氮源等营养物质在此时间段内难以支撑细菌的自我繁殖^[22]。Power 等^[23]也观察到在 48 h 内细菌在消毒前的二级出水中无明显变化。因此,消毒后二级出水中抗性菌菌落个数的增长可粗略认为

是由于被灭活细菌复活所引起的。

在本研究中,同时采用复活百分比和菌落形成能力 2 个指标评价总异养菌群和各类抗生素抗性菌的暗修复潜能。紫外线消毒后总异养菌群和抗生素抗性菌的复活百分比如图 4 所示。

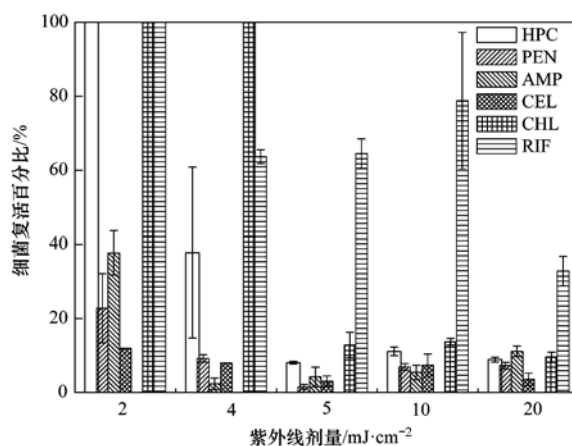


图 4 紫外线消毒后总异养菌群和抗生素抗性菌的复活百分比

Fig. 4 Reactivation of antibiotic-resistant bacteria and heterotrophic bacteria after UV disinfection

总体而言,总异养菌群的复活百分比随着紫外线消毒剂量的增大而减小。当紫外线消毒剂量为 5、10 和 $20 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时,总异养菌群的复活百分比稳定在 10% 左右。相比之下,在相同的紫外线剂量照射后,青霉素抗性菌、氨苄青霉素抗性菌和头孢氨苄抗性菌的复活百分比低于总异养菌群;随着紫外线剂量的升高,复活百分比的差距减小。当暴露于 $20 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ 紫外线照射后,青霉素抗性菌、氨苄青霉素抗性菌和头孢氨苄抗性菌的百分比仍分别高达 7.2%、11.1% 和 3.6%。

在相同的紫外线剂量照射后,氯霉素抗性菌和利福平抗性菌的复活百分比高于总异养菌群。尽管随着紫外线消毒剂量的增大,这 2 类抗生素抗性菌的复活百分比随之降低,但当暴露于 $20 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ 紫外线照射后,氯霉素抗性菌和利福平抗性菌的复活百分比仍分别高达 9.6% 和 32.9%。此外,利福平抗性菌的复活百分比显著高于总异养菌群的复活百分比 (One-way ANOVA, $P < 0.05$)。

菌落形成能力 (colony forming ability, CFA) 同样能够反映消毒后总异养菌群和抗生素抗性菌的复活潜能。紫外线消毒后,总异养菌群和抗生素抗性菌的菌落形成能力如图 5 所示。再生水中青霉素抗性菌、氨苄青霉素抗性菌、头孢氨苄抗性菌和氯霉素抗性菌与总异养菌群的菌落形成能力差别与两者的复活百分比差别类似。然而,利福平抗性菌的菌落形成能

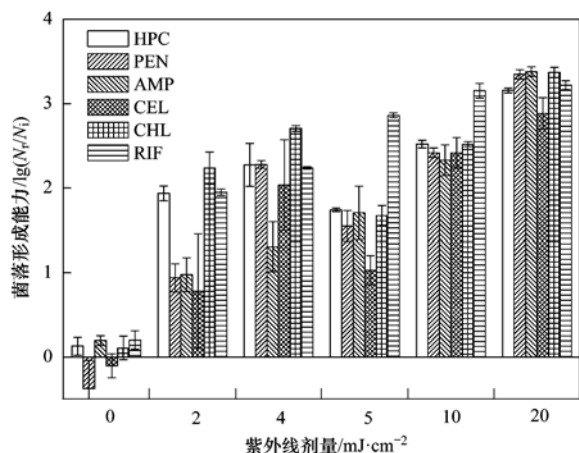


图5 紫外线消毒后总异养菌群和抗生素抗性菌的菌落形成能力

Fig. 5 Colony forming ability of antibiotic-resistant bacteria after UV disinfection

力与总异养菌群无显著性差异(One-way ANOVA, $P > 0.05$).

复活百分比与菌落形成能力结果之间差异的主要原因在于两种分析指标之间的差别,复活百分比的计算基于再生水中抗性菌的初始浓度,而菌落形成能力恰好避免了再生水中不同抗性菌的初始浓度不同这一缺陷. 本研究中,再生水中利福平抗性菌的初始浓度比总异养菌群低 1-log,而再生水中青霉素抗性菌、氨苄青霉素抗性菌、先锋霉素抗性菌和氯霉素抗性菌的初始浓度与总异养菌群在同一水平. 由于一般情况下,实际再生水中各类抗生素抗性菌的初始浓度均有所差异,因此,通过测定复活后再生水中的细菌浓度计算得到其菌落形成能力来描述实际再生水中抗生素抗性菌的复活潜能更为合理.

同时,研究结果表明,当再生水接受不大于 $20 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ 紫外线照射后,各类抗生素抗性菌的复活现象较为普遍. 当紫外线剂量较低时,再生水中青霉素抗性菌、氨苄青霉素抗性菌和头孢氨苄抗性菌的复活潜能小于总异养菌群;然而,总体而言,再生水中抗生素抗性菌的复活潜能与总异养菌群差别不大. 当紫外线消毒剂量达到 $20 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时,经过 22 h 静置,再生水中的抗生素抗性菌的菌落形成能力比消毒结束时的高近 3-log,这说明当再生水处理后经过一定时间的储存与运输, $20 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ 紫外线消毒剂量用于再生水中的抗生素抗性菌控制是不够的.

3 结论

紫外线消毒对再生水中利福平抗性菌的灭活率

略低于总异养菌群,但差别并不显著;青霉素抗性菌、氨苄青霉素抗性菌、头孢氨苄抗性菌和氯霉素抗性菌的灭活率与总异养菌群灭活率相当. 当再生水接受不大于常规紫外线消毒剂量 $20 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ 消毒后,抗生素抗性菌的复活现象较为普遍,因此,常规的紫外线消毒剂量不能有效控制再生水储存或运输过程中抗生素抗性菌的复活. 当紫外线剂量较低时,青霉素抗性菌、氨苄青霉素抗性菌和头孢氨苄抗性菌的复活潜能小于总异养菌群,氯霉素抗性菌与利福平抗性菌的复活潜能与总异养菌群差别不大.

参考文献:

- [1] Yang H, Abbaspour K C. Analysis of wastewater reuse potential in Beijing[J]. Desalination, 2007, **212**(1-3): 238-250.
- [2] Toze S. Microbial pathogens in wastewater[R]. CSIRO Land and Water Technical Report, 1997, **1**: 97.
- [3] WHO. Emerging issues in water and infectious disease[R]. World Health Organization, 2003. 1-22.
- [4] Amahmid O, Bouhoum K. Assessment of the health hazards associated with wastewater reuse; transmission of geohelminthic infections (Marrakech, Morocco)[J]. International Journal of Environmental Health Research, 2005, **15**(2): 127-133.
- [5] Campos C. New perspectives on microbiological water control for wastewater reuse[J]. Desalination, 2008, **218**(1-3): 34-42.
- [6] Huang J J, Xi J Y, Hu H Y, et al. Regrowth characteristics of antibiotic-resistant bacteria in the secondary effluent of a municipal wastewater treatment plant[A]. In: The 5th IWA-ASPIRE conference[C]. Korea, Daejeon, 2013, 9.
- [7] Grabow W O K, Van Zyl M. Behaviour in conventional sewage purification processes of coliform bacteria with transferable or non-transferable drug-resistance[J]. Water Research, 1976, **10**(8): 717-723.
- [8] Armstrong J L, Calomaris J J, Seidler R J. Selection of antibiotic-resistant standard plate count bacteria during water treatment[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1982, **44**(2): 308-316.
- [9] Murray G E, Tobin R S, Junkins B, et al. Effect of chlorination on antibiotic resistance profiles of sewage-related bacteria[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1984, **48**(1): 73-77.
- [10] Meckes M C. Effect of UV light disinfection on antibiotic-resistant coliforms in wastewater effluents[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1982, **43**(2): 371-377.
- [11] Staley J T, Crosa J, DeWalle F, et al. Effect of wastewater disinfectants on survival of r-factor coliform bacteria[R]. EPA/600/S2-87/092. U. S. Environmental Protection Agency, Washington, D. C., 1988.
- [12] Arturo-Schaan M, Sauvager F, Mamez C, et al. Use of peracetic acid as a disinfectant in a water-treatment plant; effect on the plasmid contents of *Escherichia coli* strains[J]. Current Microbiology, 1996, **32**(1): 43-47.

- [13] Guo M T, Huang J J, Hu H Y, *et al.* Growth and repair potential of three species of bacteria in reclaimed wastewater after UV disinfection[J]. Biomedical and Environmental Sciences, 2011, **24**(4): 400-407.
- [14] 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): 209-16.
- [15] Guo M T, Hu H Y, Bolton J R, *et al.* Comparison of low-and medium-pressure ultraviolet lamps; photoreactivation of *Escherichia coli* and total coliforms in secondary effluents of municipal wastewater treatment plants [J]. Water Research, 2009, **43**(3): 815-821.
- [16] Lindenauer K G, Darby J L. Ultraviolet disinfection of wastewater; effect of dose on subsequent photoreactivation[J]. Water Research, 1994, **28**(4): 805-817.
- [17] ISO 6222, Water quality-Integration of culturable microorganisms colony count by inoculation in a nutrient agar culture medium [S]. 1999.
- [18] Huang J J, Hu H Y, Lu S Q, *et al.* Monitoring and evaluation of antibiotic-resistant bacteria at a municipal wastewater treatment plant in China[J]. Environment International, 2012, **42**: 31-36.
- [19] Clinical and Laboratory Standards Institute (CLSI). Performance Standards for Antimicrobial Susceptibility Testing; Sixteenth Informational Supplement[S], 2006.
- [20] Templeton M R, Oddy F, Leung W K, *et al.* Chlorine and UV disinfection of ampicillin-resistant and trimethoprim-resistant *Escherichia coli* a paper submitted to the journal of environmental engineering and science [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2009, **36**(5): 889-894.
- [21] Guo M T, Hu H Y, Liu W J. Preliminary investigation on safety of post-UV disinfection of wastewater; bio-stability in laboratory-scale simulated reuse water pipelines[J]. Desalination, 2009, **239**(1-3): 22-28.
- [22] Huang J J, Hu H Y, Tang F *et al.* Inactivation and reactivation of antibiotic-resistant bacteria by chlorination in secondary effluents of a municipal wastewater treatment plant[J]. Water Research, 2011, **45**(9): 2775-2781.
- [23] Power K N, Schnerder R P, Marshall K C. The effect of growth conditions on survival and recovery of *Klebsiella oxytoca* after exposure to chlorine[J]. Water Research, 1997, **31**(1): 135-139.

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