

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第10期

Vol.38 No.10

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国城市热岛时空特征及其影响因子的分析 曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 徐家平 (3987)
卫星遥感在 NO_x 总量控制中的应用 武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇 (3998)
京津冀城市群空气污染的模式总结与治理效果评估 王振波, 梁龙武, 林雄斌, 刘海猛 (4005)
南京北郊冬春季气溶胶数浓度变化特征分析 吴丹, 张璠, 刘刚, 吴明, 夏俊荣, 盖鑫磊, 李凤英, 杨孟 (4015)
冬季临安大气本底站气溶胶来源解析及其粒径分布特征 施双双, 王红磊, 朱彬, 林旭, 郭婷, 沙丹丹, 蒋琳, 张玉欣, 师远哲 (4024)
成都市大气颗粒物粒径分布及水溶性离子组成的季节变化特征 陶月乐, 李亲凯, 张俊, 李斯奇, 李晓东 (4034)
泉州市大气 PM_{2.5} 中水溶性离子季节变化特征及来源解析 张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 孙境蔚, 张棕巍, 许文质 (4044)
2011~2012 年北京大气 PM_{2.5} 中重金属的污染特征与来源分析 周雪明, 郑乃嘉, 李英红, 段菁春, 谭吉华, 张元勋, 贺克斌, 马永亮 (4054)
厦门海沧区 PM_{2.5} 中金属元素污染评价及来源分析 赵莉斯, 于瑞莲, 徐玲珍, 胡恭任, 吴鑫, 陈衍婷 (4061)
道路扬尘 PM_{2.5} 中金属元素污染特征及健康风险评价 张静, 张衍杰, 方小珍, 李风华, 吴琳, 毛洪钧 (4071)
福建九仙山大气 PM₁₀ 及部分化学组成的季节变化 魏雅, 林长城, 胡清华, 吴水平 (4077)
北京城区冬季空气污染时期 C2~C6 碳氢化合物含量特征 李月, 魏巍, 杨干, 陈东升, 程水源, 韩力慧 (4084)
2016 年北京市春节大气颗粒物污染特征激光雷达监测分析 石琳琳, 李令军, 李倩, 姜磊, 周一鸣, 李云婷, 刘保献, 张大伟 (4092)
廊坊市夏季臭氧体积分数影响因素及生成敏感性 李磊, 赵玉梅, 王旭光, 刘炜, 佟洁, 宋丽芸, 李怀瑞, 王清川 (4100)
人类活动对漓江地表水体水-岩作用的影响 李磊, 赵玉梅, 王旭光, 刘炜, 佟洁, 宋丽芸, 李怀瑞, 王清川 (4108)
岩溶区水库冬季溶解有机质组成特征及来源:以桂林五里峡水库为例 卢晓漩, 彭文杰, 李强, 房君佳, 靳振江, 宋昂, 黄炳惠, 于爽 (4120)
岩溶关键带微量元素运移的时空变化:以豫西鸡冠洞为例 梁沙, 杨琰, 张娜, 孙喆, 张萍, 田宁, 凌新有, 任小敏 (4130)
龟石水库夏季富营养化状况与蓝藻水华暴发特征 苟婷, 马千里, 王振兴, 王丽, 姚玲爱, 许振成, 赵学敏, 梁荣昌, 蓝郁 (4141)
阿哈水库叶绿素 a 时空分布特征及其与藻类、环境因子的关系 罗宜富, 李磊, 李秋华, 焦树林, 李红梅, 陈峰峰 (4151)
天目湖沙河水库浮游植物群落结构的时空异质性 孙祥, 朱广伟, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 史浩辰, 杭心语, 徐涤非 (4160)
程海沉积物重金属时空变化及人为污染与潜在生态风险 于真真, 刘恩峰, 张恩楼, 林琪, 沈吉, 王荣, 李艳玲 (4169)
自然降雨条件下红壤坡地磷素随径流垂向分层输出特征 左继超, 郑海金, 奚同行, 王凌云, 聂小飞, 刘昭 (4178)
邻苯二甲酸酯在三峡库区消落带非淹水期土壤中污染特征及健康风险 杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4187)
滦河干流水体多环芳烃与有机氯农药季节性分布、组成及源解析 王乙震, 张世禄, 孔凡青, 袁媛 (4194)
潍坊滨海经济技术开发区饮用水中有机磷酸酯的水平及人体暴露风险评估 董政, 马玉龙, 李珺琪, 袁浩东, 金军, 王英 (4212)
道路灰尘中有机磷阻燃剂污染特征及人体暴露 李静, 王俊霞, 许婉婷, 尚荣双, 顾海东, 温耀进, 张丽君 (4220)
居民经手口途径摄入含 PAHs 颗粒物的致癌风险评价 佟瑞鹏, 杨校毅, 张磊, 程蒙召 (4228)
基于空间自相关的地下水脆弱性时空演变 刘宇, 兰双双, 张永祥, 李芳春, 侯树楷 (4236)
Ag-AgI/CN/MA 复合物的制备及其可见光催化性能 张塞, 张丽丽, 胡春 (4245)
凤眼莲对富营养化水体中氨氮化和反硝化微生物的影响 李洁, 蒋丽娟, 王晓琳, 肖琳 (4253)
利用含 Cu(II) 废水强化微生物燃料电池处理含 Cr(VI) 废水 熊晓敏, 吴夏芈, 贾红华, 雍晓雨, 周俊, 韦萍 (4262)
生态高负荷土地快速渗滤系统处理猪场废水的效能及微生态 宿程远, 刘凡凡, 钟余, 黄智, 郑鹏, 农志文, 卢宇翔 (4271)
细菌对城市污水中小球藻生长和油脂积累的影响 涂仁杰, 金文标, 韩松芳, 陈洪一 (4279)
污水处理厂消毒技术对抗生素抗性菌的强化去除 刘亚兰, 马岑鑫, 丁河舟, 邱勇, 李冰, 王硕, 李激 (4286)
AnMBR-A-MBR 和 A²-MBR 工艺处理焦化废水效果与急性毒性物质特征对比 朱佳迪, 李菲菲, 陈吕军 (4293)
基于实时控制技术的 CANON 工艺稳定性运行 孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (4302)
新型硫铁复合填料强化再生水深度脱氮除磷 周彦卿, 郝瑞霞, 刘思远, 王丽莎 (4309)
连续流亚硝化中试反应器的启动及其能力提升 朱强, 刘凯, 董石语, 顾澄伟, 王凡, 李祥, 黄勇 (4316)
基于不同接种污泥复合型厌氧氨氧化反应器的快速启动特征 阎刚, 李田, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, Samwine Thomas (4324)
两段式曝气对好氧颗粒污泥脱氮性能的影响 王文啸, 卞伟, 王盟, 阚睿哲, 赵青, 梁东博, 李军 (4332)
醋糟高效厌氧消化体系构建 周云龙, 许之扬, 赵明星, 施万胜, 黄振兴, 何迪, 阮文权 (4340)
基于总量及形态的土壤重金属生态风险评价对比:以龙岩市适中镇为例 王蕊, 陈明, 陈楠, 刘冠男, 张二喜, 刘晓端, 张佳文 (4348)
锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价 陈凤, 董泽琴, 王程程, 韦雪花, 胡宇, 张丽娟 (4360)
三峡库区典型消落带 CH₄ 排放的变化特征及影响因素 柴雪思, 郝庆菊, 黄哲, 范志伟, 江长胜 (4370)
地膜覆盖对菜地生态系统 N₂O 排放的影响 冯迪, 郝庆菊, 张凯莉, 石将来, 石孝均, 江长胜 (4380)
不同用量竹炭对污泥堆肥过程温室气体排放的影响 向秋洁, 杨雨洽, 张成, 相欣奕, 木志坚 (4390)
半固态培养条件下烟曲霉去除土壤中镉 陈耀宁, 汪元南, 黎媛萍, 李辉, 陈艳容, 伍艳馨, 苟宇, 朱福造, 张道利, 刘耀, 曾光明 (4398)
猪粪堆肥过程中金霉素去除及重金属形态变化 温沁雪, 曹永森, 陈志强 (4405)
堆肥-生物强化对重度石油污染土壤的修复作用 吴蔓莉, 陈凯丽, 叶茜琼, 祁燕云, 徐会宁, 王卓, 薛鹏飞, 朱常琳 (4412)
微生物多样性对土壤碳代谢特征的影响 安丽芸, 李君剑, 严俊霞, 李洪建 (4420)
冬小麦田 O₃ 气孔与非气孔沉降及风险评估 徐静馨, 郑有飞, 赵辉, 储仲芳, 黄积庆, 袁月 (4427)
中国西南酸雨区降水化学特征研究进展 周晓得, 徐志方, 刘文景, 武瑶, 赵童, 蒋浩 (4438)
《环境科学》征稿简则(4261) 《环境科学》征订启事(4270) 信息(4186, 4404, 4446)

污水处理厂消毒技术对抗生素抗性菌的强化去除

刘亚兰¹, 马岑鑫¹, 丁河舟¹, 邱勇², 李冰², 王硕^{1,3,4}, 李激^{1,3,4*}

(1. 江南大学环境与土木工程学院, 无锡 214122; 2. 清华大学环境学院, 北京 100084; 3. 江苏省厌氧生物技术重点实验室, 无锡 214122; 4. 江苏高校水处理技术与材料协同创新中心, 苏州 215009)

摘要: 基于消毒技术对污水处理厂出水中总异养菌(total heterotrophic bacteria, HPC)及 5 种抗生素抗性菌(antibiotic resistant bacteria, ARB): 氨苄霉素抗性菌(AMP)、红霉素抗性菌(ERY)、四环素抗性菌(TET)、卡那霉素抗性菌(KAN)、环丙沙星抗性菌(CIP)的去除情况研究, 分析消毒技术对 ARB 的强化去除效果. 结果表明, 实际污水处理厂的紫外消毒对 ARB 去除率仅为 18.2%~40.9%, 且 AMP 含量最高; 另外, 消毒技术对 ERY 有选择性去除效果, 对其他 4 种 ARB 无明显选择性去除效果($P < 0.05$); 最后结合次氯酸钠、臭氧、紫外消毒处理对 COD、 NH_4^+ -N 的去除效果, 确定强化去除 ARB 的消毒方式中臭氧, 次氯酸钠和紫外的最佳浓度和剂量依次为 $5.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $25.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $45.0 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$, ARB 去除率依次为 45.5%~74.5%、66.1%~85.5%、68.6%~85.5%, 另外次氯酸钠耦合紫外消毒强化去除 ARB 的效果更佳.

关键词: 污水处理厂; 抗生素抗性菌; 臭氧消毒; 紫外消毒; 次氯酸钠消毒

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)10-4286-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201612141

Enhanced Antibiotic Resistant Bacteria Removal from Wastewater Treatment Plant by Different Disinfection Technologies

LIU Ya-lan¹, MA Cen-xin¹, DING He-zhou¹, QIU Yong², LI Bing², WANG Shuo^{1,3,4}, LI Ji^{1,3,4*}

(1. School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Anaerobic Biotechnology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 4. Jiangsu College of Water Treatment Technology and Material Collaborative Innovation Center, Suzhou 215009, China)

Abstract: Based on the removal of total heterotrophic bacteria (HPC) and antibiotic resistant bacteria (ARB), including the ampicillin resistant bacteria (AMP), erythromycin resistant bacteria (ERY), tetracycline resistant bacteria (TET), kanamycin resistant bacteria (KAN), and ciprofloxacin resistant bacteria (CIP), this study investigates the enhanced removal performance of ARB by different disinfection technologies. The experimental results showed that ARB removal by ultraviolet (UV) disinfection from the wastewater treatment plant (WWTP) was only 18.2%-40.9% and AMP was the highest in content. ERY could be selectively removed by different disinfection technologies; however, there was no distinguished selective removal performance for other four types of ARB ($P < 0.05$). For ARB, COD and NH_4^+ -N removal, the optimal ozone, chlorination, and UV concentration or dosage were $5.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $25.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, and $45.0 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$, respectively, and the corresponding ARB removal efficiencies were 45.5%-74.5%, 66.1%-85.5%, and 68.6%-85.5%. Furthermore, the combined UV and chlorine treatment could achieve better ARB removal performance.

Key words: wastewater treatment plant (WWTP); antibiotic resistant bacteria (ARB); ozone disinfection; ultraviolet (UV) disinfection; sodium hypochlorite disinfection

根据国家食品药品监督管理局和化学工业学会和制药工业学会相关统计, 我国是抗生素的生产大国, 年生产量约为 21 万 t^[1]. 抗生素的大量使用使环境中抗生素抗性菌(antibiotic resistant bacteria, ARB)和抗生素抗性基因(antibiotic resistant gene, ARG)的含量也随之增加, 而且城市污水处理厂已经成为环境体系中 ARB 和 ARG 的储存库^[2]. 但是污水处理厂的二级水处理技术对 ARB 的消减作用不佳^[3], 污水处理厂出水中仍含大量 ARB, 其含量为 $5.0 \times 10^2 \sim 6.1 \times 10^5 \text{ CFU}\cdot(100 \text{ mL})^{-1}$, 具有潜在的环境健康风险^[4]. 而研究表明污水处理厂的消毒处理技术能够进一步去除生化反应没有去除的

ARB, 减少 ARB 对环境的危害, 从而保护公众身体健康^[5].

消毒处理技术是污水处理工艺的重要组成部分, 国家环境保护总局(现国家环境保护部)于 2003 年要求“城镇污水处理厂出水应结合氯、紫外线或臭氧等消毒处理, 保证污水出水中粪大肠杆菌

收稿日期: 2016-12-15; 修订日期: 2017-05-14

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07306-001); 江苏省重点研发计划(社会发展)科技示范工程项目(BE2015622)

作者简介: 刘亚兰(1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为污水处理厂抗生素抗性菌特性, E-mail: ly19911210@163.com

* 通信作者, E-mail: lji18@126.com

小于 10^3 个 $\cdot L^{-1}$ ”。如今, 污水处理工艺中常见的消毒技术有臭氧消毒、紫外消毒和氯消毒, 但是关于消毒技术去除 ARB 的研究并不是很多, 而且结论也存在一定的差异性, 没有提出对 ARB 的有效控制和去除方案。

Guo 等^[6]认为紫外剂量为 $5.0 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, 污水处理厂出水中红霉素抗性菌和四环素抗性菌的去除率可达到 1.4 log 和 1.1 log ; Oh 等^[7]在研究不同消毒技术对 ARB 和 ARG 的去除时发现: 当次氯酸钠浓度超过 $30.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, ARB 和 ARG 的去除率超过 90%, 臭氧浓度超过 $3.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时 ARB 和 ARG 的去除率超过 90%, 另外臭氧消毒过程中投加双氧水等氧化剂能够一定程度上提高 ARB 的去除效率。Zhang^[8]通过分析不同的消毒技术对抗生素抗性基因的去除效果发现, 紫外消毒 ($500.0 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$)、氯消毒 ($40.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、紫外 ($62.0 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$) 耦合次氯酸钠 ($5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 消毒等对抗生素抗性基因的去除效果依次为 $0.8 \sim 1.2 \text{ log}$ 、 $1.7 \sim 2.3 \text{ log}$ 、 $1.1 \sim 1.9 \text{ log}$ 和 $2.4 \sim 3.5 \text{ log}$ 。但是,

Munir 等^[4]研究发现氯消毒和紫外消毒对 ARB 的去除效果并不是很明显 ($P > 0.05$)。

因此本文通过研究污水处理厂出水经过不同消毒技术处理后不同 ARB 的去除效果, 分析不同消毒技术去除 ARB 的优劣性。同时, 结合不同消毒技术对化学需氧量 (COD)、总氮 (TN) 和氨氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 的去除情况, 筛选适合于高排放标准污水处理厂的消毒方法和消毒剂最佳投量, 以期对未来城市污水处理厂关于 ARB 的环境风险评估和优化去除提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 目标污水处理厂

本研究选择位于无锡市的某污水处理厂, 该污水处理厂采用传统的序批式活性污泥工艺 (sequencing batch reactor, SBR), 出水达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 的一级 A 标准, 消毒采用紫外消毒技术, 该污水处理厂的基本情况如表 1 所示。

表 1 污水处理厂基本情况

Table 1 List of wastewater treatment plants

设计水量 $\times 10^4$ $/\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	服务人口 $/\text{万人}$	工业废水 比例/%	工艺技术	消毒方式	消毒剂量 $/\text{mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$	消毒强度 $/\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$	消毒时间 $/\text{s}$
11.0	39.0	45.0	SBR	紫外消毒	30.0	3	10

1.2 样品采集

样品采集于污水处理厂 SBR 工艺的滤布滤池出水处和紫外消毒出水处, 从而有利于对比该污水处理厂实际消毒方式对 ARB 的去除效果与本实验的差异。样品储存于 5 L 无菌采样瓶, 采集结束后立即运回实验室于 4°C 保存, 并在 48 h 内稀释进行接种培养实验。

1.3 实验装置

本研究采用静态模拟实验方式, 共分为 4 种消毒方式, 依次以 a、b、c、d 表示, a 为臭氧消毒, 通过臭氧发生器 (COM-AD-01) 控制臭氧浓度, 消毒时间为 10 min; b 为紫外消毒, 紫外剂量 = 紫外强度 \times 消毒时间。其中紫外光照由紫外灯管 (YUVC-30W) 提供, 紫外强度利用紫外辐射计 (UV-B) 测定, 实验在置于磁力搅拌器上并放入转子搅拌的烧杯中进行; c 为次氯酸钠消毒, 采用六联搅拌器 (MY3000-6A), 消毒 30 min, 转速为 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$; d 为紫外耦合次氯酸钠消毒, 次氯酸钠消毒时间 30 min, 其中紫外消毒剂量恒定为 $30 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

1.4 抗生素抗性菌的检测方法

参考抗生素的分类、抗生素的使用以及抗生素抗性菌在我国的分布情况^[9-11], 本研究选择氨苄霉素抗性菌 (ampicillin resistant bacteria, AMP)、红霉素抗性菌 (erythromycin resistant bacteria, ERY)、四环素抗性菌 (tetracycline resistant bacteria, TET)、卡那霉素抗性菌 (kanamycin resistant bacteria, KAN) 及环丙沙星抗性菌 (ciprofloxacin resistant bacteria, CIP) 分析该污水处理厂消毒前后出水中 ARB 的分布规律, 并利用传统的异养菌平板培养法来检测目标 ARB。同时为了说明 ARB 占 HPC 的比例, 也对消毒前后出水中总异养菌数量进行技术分析。

抗生素溶液的配制: 目标抗生素浓度依据《临床和实验室标准协会》(Clinical And Laboratory Standards Institute, CLSI)^[12] 中抗生素对细菌的最小抑制浓度确定, 具体如表 2 所示。首先配制高浓度的抗生素作为母液, 其中氨苄霉素 ($10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)、四环素 ($1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)、卡那霉素 ($10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 和环丙沙

星($1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)溶液的溶剂均为超纯水, 并采用 $0.45 \mu\text{m}$ 水相滤头过滤; 而红霉素($10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)的溶剂为甲醇, 并采用 $0.45 \mu\text{m}$ 有机相滤头过滤. 过滤之后

的抗生素溶液需保存于 -20°C 冰箱中, 且保存时间不宜超过一周. 在使用时根据所需要抗生素的浓度取相应体积母液进行稀释.

表 2 目标抗生素基本信息及使用浓度

Table 2 Basic information on and concentrations of objective antibiotics

中文名	英文名	CAS	分子式	类别	浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	公司	纯度/%
氨苄霉素	ampicillin	69-52-3	$\text{C}_{16}\text{H}_{19}\text{N}_3\text{O}_4\text{SNa}$	β -内酰胺类	32	INALCO	98
红霉素	erythromycin	114-0-8	$\text{C}_{37}\text{H}_{67}\text{NO}_{13}$	大环内酯类	64	INALCO	99
四环素	tetracycline	64-75-5	$\text{C}_{22}\text{H}_{24}\text{N}_2\text{O}_8$	四环素类	16	INALCO	99
卡那霉素	kanamycin	25398-94-0	$\text{C}_{18}\text{H}_{38}\text{N}_4\text{O}_{11}\text{H}_2\text{SO}_4$	氨基环醇类	64	INALCO	98
环丙沙星	ciprofloxacin	85721-33-1	$\text{C}_{17}\text{H}_{18}\text{FN}_3\text{O}_3$	喹诺酮类	4	INALCO	99

抗生素培养基制备: 培养基 R2A agar (CM0906, OXOID, 配制浓度为 $18.1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$), 用蒸馏水配好后于 121°C 高压灭菌 20 min, 冷却至 $60 \sim 70^\circ\text{C}$ 后根据表 2 中抗生素的使用浓度, 加入一定量的抗生素母液(用于总异养菌计数的平板无需添加抗生素, 直接倒平板即可), 与培养基混合均匀后倒入平板中, 待冷却至室温后使用.

ARB 检测: 首先用磷酸盐缓冲液 (PBS, $\text{pH} = 7.4$) 将待测水样梯度稀释, 取 $50 \mu\text{L}$ 接种于含抗生素的 R2A 琼脂平板中, 在 37°C 培养箱中培养 24 h, 选取菌落数在 $30 \sim 300$ 个之间的平板进行计数, 细菌计数采用细菌活菌平板计数方法^[15]. HPC 检测的方法同 ARB 一样, 只是将接种平板更换为无抗生素平板.

1.5 水质指标的测试方法

本实验过程中各项水质指标采用文献[14]的方法测定, 其中 COD 采用重铬酸钾快速烘箱法; $\text{NH}_4^+ -\text{N}$ 采用纳氏试剂分光光度法; TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法.

2 结果与讨论

2.1 污水处理厂消毒前后抗生素抗性菌的分布

由图 1 可知, 目标污水处理厂消毒前后出水中 5 种目标 ARB 的丰度排序为 $\text{AMP} > \text{ERY} > \text{TET} > \text{KAN} > \text{CIP}$, 经过紫外消毒处理后污水处理厂出水中 HPC 由 $13.0 \times 10^3 \text{ CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$ 减少至 $7.0 \times 10^3 \text{ CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$, 去除率为 53.8%; ARB 由 $(0.2 \sim 5.6) \times 10^3 \text{ CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$ 减少到 $(0.1 \sim 4.0) \times 10^3 \text{ CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$, 去除率为 18.2% ~ 40.9%. ARB 的分布与区域周边生活污水、工业废水的排放以及人类活动等因素密切相关^[15]. 本研究中目标污水处理厂进水中含有 45.0% 的工业废水, AMP 是该污水处理厂出水中含量最多的 ARB. Yuan 等^[16] 也认为污水处理厂出水中 β -内酰胺类 ARB 占 HPC 的比例

高达 30%. 而且研究者也发现污水处理厂 β -内酰胺类 ARB 浓度明显高于其他类 ARB^[9, 17], 其主要原因是氨苄霉素属于 β -内酰胺类抗生素, 而这类抗生素是我国医疗抗生素中最常使用的药物^[18], 该类抗生素大量排放后会使其抗性菌的增多^[19].

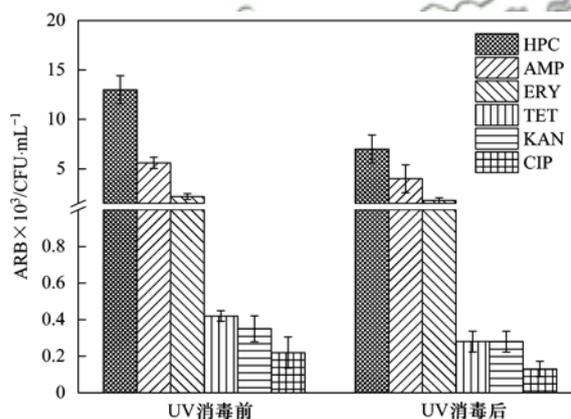
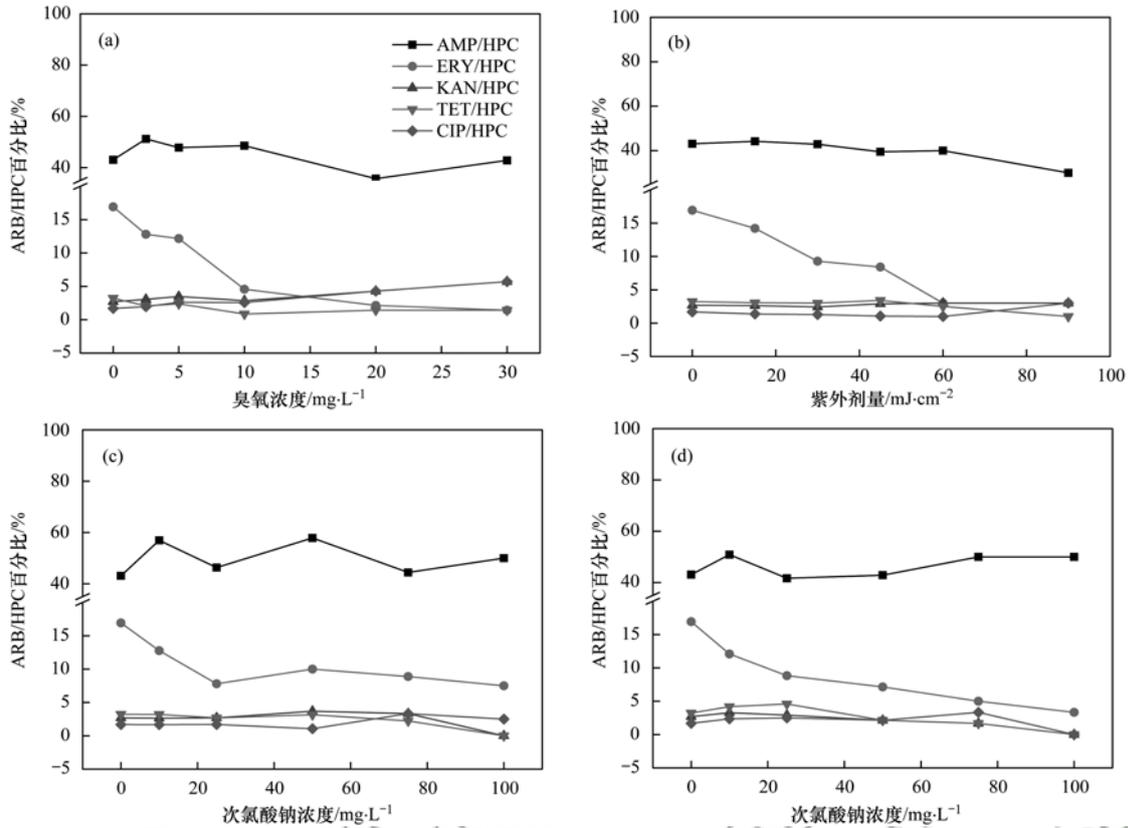


图 1 污水处理厂紫外消毒前后抗生素抗性菌的分布情况

Fig. 1 Distribution of ARB before and after UV disinfection in WWTP

2.2 不同消毒技术对抗生素抗性菌的选择性去除

抗生素抗性菌占总异养菌的比例 (ARB/HPC) 变化规律可进一步表明不同消毒处理技术对 ARB 的选择性去除效果. 如图 2 所示, AMP/HPC 最高为 37.5% ~ 57.9%; ERY/HPC 次之, 约为 1.4% ~ 16.9%; TET/HPC 、 KAN/HPC 、 CIP/HPC 均在 5.0% 以下. 从中可知, 随着消毒剂量增加, ARB/HPC 也发生变化. 通过臭氧、紫外以及氯消毒之后, ERY/HPC 和 KAN/HPC 均有所降低, CIP/HPC 却有所增加, 而 AMP/HPC 和 TET/HPC 无明显变化趋势 ($P < 0.05$). 现阶段关于消毒技术对 ARB 的选择性去除效果仍有争议, 有研究者^[20] 认为紫外消毒会使 TET/HPC 上升; 但也有研究者^[21] 认为紫外消毒会使 ERY/HPC 和 CIP/HPC 下降, 却对 TET 无选择性去除效果. 这可能与污水进水水质、取样



(a) 为 ARB/HPC 百分比随臭氧浓度变化的情况; (b) 为 ARB/HPC 百分比随紫外剂量变化的情况; (c) 为 ARB/HPC 百分比随次氯酸钠浓度变化的情况; (d) 为在紫外剂量为 $30.0 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的条件下, ARB/HPC 百分比随次氯酸钠浓度变化的情况

图 2 不同消毒技术对抗生素抗性菌占总异养菌比例的影响

Fig. 2 Proportion of different ARB accounted for HPC by different disinfection processes

方式和消毒剂量等不同有关。

2.3 不同消毒技术对抗生素抗性菌的强化去除

不同消毒技术对不同 ARB 的强化去除效果不同。对比实际污水处理厂中紫外消毒对 HPC (去除率为 53.8%) 和 ARB (去除率为 18.2% ~ 40.9%) 的去除效果, 发现增加污水处理厂消毒浓度或剂量能够达到强化去除 ARB 的效果, 甚至使部分 ARB 失活。图 3(a) 所示, 臭氧浓度的增加能够强化去除 ARB ($P < 0.05$)。臭氧浓度在 $5.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, HPC 和 ARB 含量迅速降低且去除率在 45.5% ~ 74.5%; 当臭氧浓度增加到 $30.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, ARB 基本失活。其中 ERY 的去除率高达 99.6%, 这是因为大环内酯类抗生素含有不饱和的酯键, 该键为易水解的快速反应敏感化学键^[22], 而臭氧一般会优先对反应速度快的物质发挥杀菌作用, 抑制这些抗生素的作用机制, 进而减少 ARB 含量。另外, 臭氧与不同的过滤处理 (砂滤或活性炭) 联合作用时, 可以进一步降低污水处理厂出水的抗生素抗性菌含量^[23]。

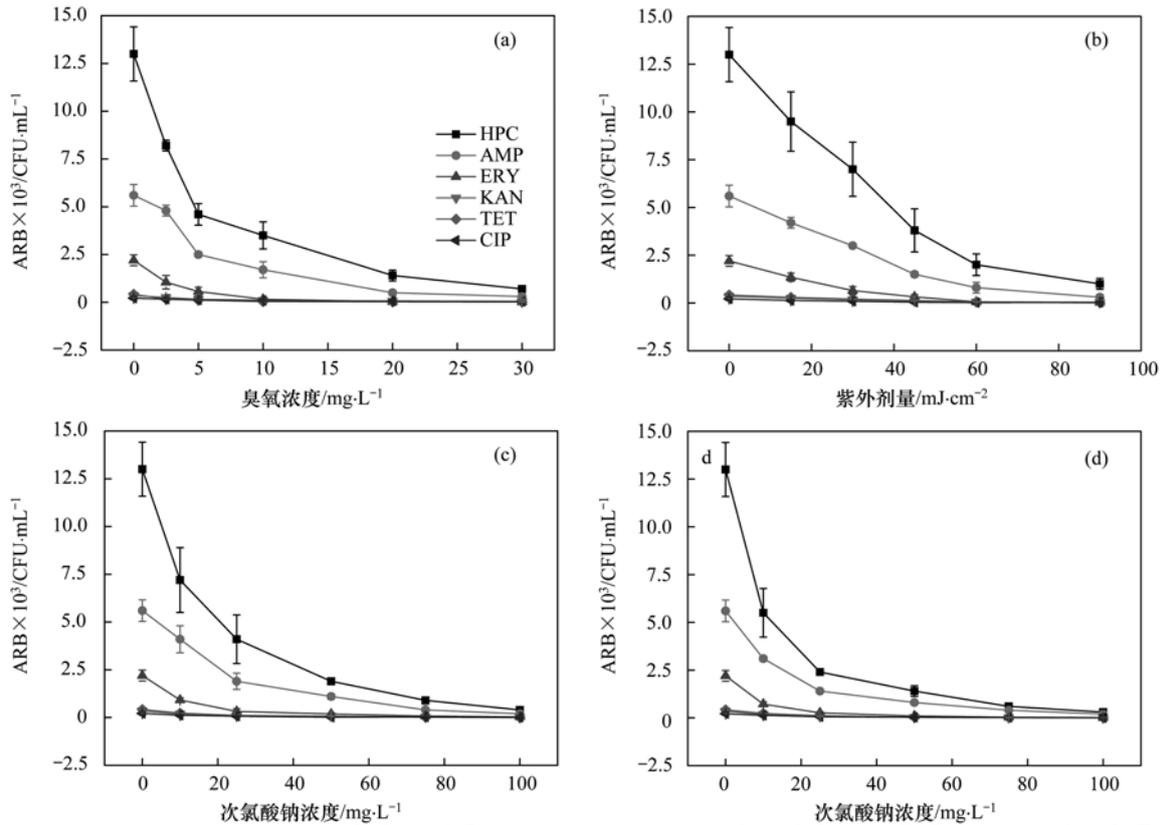
图 3(b) 所示, 紫外剂量的增加能够强化 ARB

($P < 0.05$) 的去除。紫外消毒对 HPC 和 ARB 的去除效果相对较差, 紫外剂量为 $30.0 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时, ARB 去除率为 46.2% ~ 70.5%; 当紫外剂量达到 $90.0 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时, ARB 去除率为 86.4% ~ 98.6%。Guo 等^[21] 也发现当污水处理厂的紫外剂量高于 $50 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时 ARB 基本失活。另外, 可以通过减缓出水流速, 增加出水经过紫外消毒的停留时间实现强化去除 ARB 的目的。

图 3(c) 所示, 次氯酸钠浓度增加能够强化去除 ARB ($P < 0.05$)。次氯酸钠浓度在 $25.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, ARB 去除率为 66.1% ~ 85.5%, 且高浓度的次氯酸钠消毒对 5 种 ARB 均有较好的去除效果, 甚至使部分 ARB 失活, 如 TET、KAN、CIP。对比图 3(c) 和图 3(d), 表明次氯酸钠耦合紫外的消毒方式对 HPC 和 ARB 的去除效果优于单独的次氯消毒, 该观点与 Munir 等^[4] 的实验结论一致, 次氯酸钠浓度和紫外剂量分别在 $25.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $30.0 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时, ARB 去除率为 72.7% ~ 88.2%。

2.4 不同消毒技术对水质指标的影响

图 4(a) 所示, 臭氧浓度的增加能够加以强化



(a) 为 ARB 浓度随臭氧浓度变化的情况; (b) 为 ARB 浓度随紫外剂量变化的情况; (c) 为 ARB 浓度随次氯酸钠浓度变化的情况; (d) 为在紫外剂量为 $30.0 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的条件下, ARB 浓度随次氯酸钠浓度变化的情况

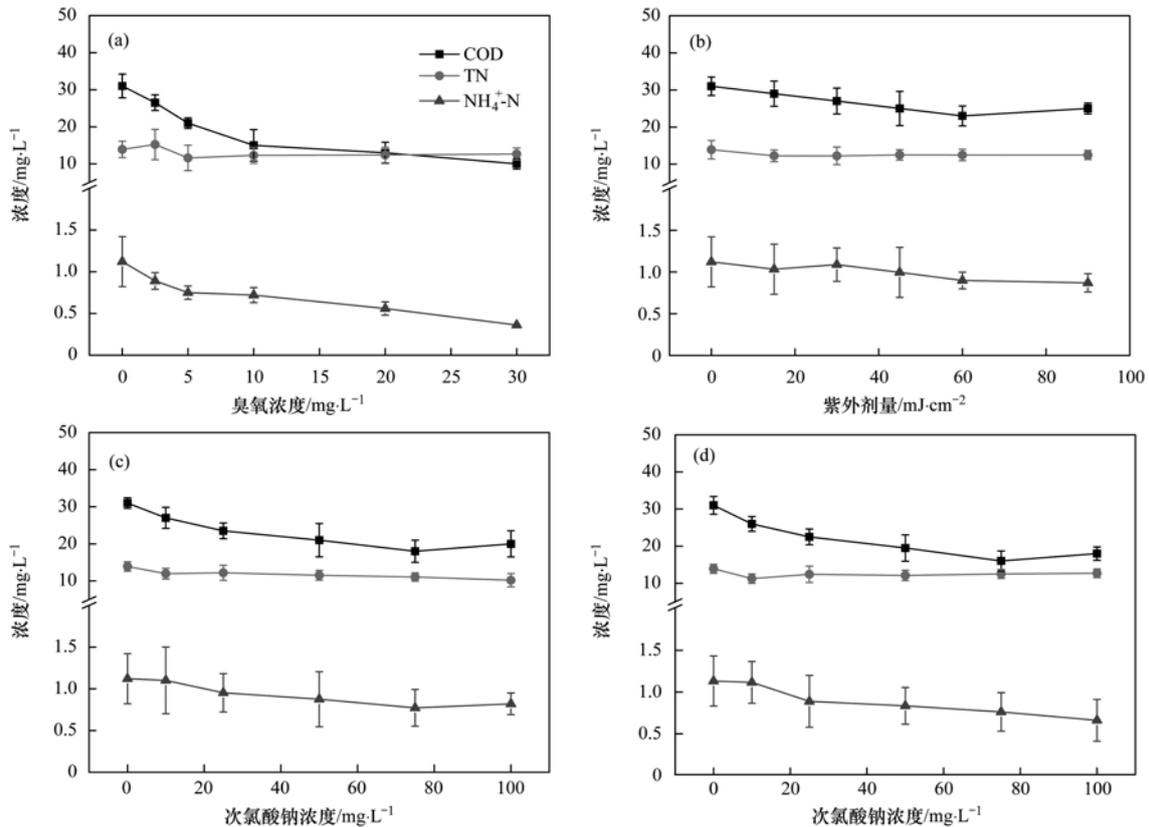
图 3 不同消毒技术对不同抗生素抗性菌的去除效果

Fig. 3 Removal efficiency of ARB by different disinfection processes

COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除 ($P < 0.05$). 臭氧浓度为 $10.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 分别由 $31.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $15.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 当臭氧浓度达到 $30.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率约为 68.0% , 与 Martínez 等^[24] 研究成果较为接近. 图 4(b) 所示, 紫外剂量的增加能够促进去除 COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ($P < 0.05$). 但是紫外消毒对 COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果较差, 紫外剂量为 $90.0 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时, COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率仅为 19.4% 和 11.2% , 该结论与 Vaccari 等^[25] 的结论相吻合. 对比图 4(c) 和图 4(d), 发现次氯酸钠浓度的增加能够强化去除 COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ($P < 0.05$), 并且紫外耦合次氯酸钠消毒时, 低浓度次氯酸钠 ($25.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 条件下, COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 分别降至 $22.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 相应去除率分别为 27.4% 和 21.7% ; 当次氯消毒浓度高达 $100.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率依次为 41.9% 和 42.0% . 其原因在于, 臭氧和次氯酸钠能够将水体中的有机物质氧化, 从而使污水中 COD 降低^[26, 27]. 而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去

除主要与次氯酸钠的消毒机理有关, 在氨氮存在的条件下, 氯和氨氮反应生成一氯胺、二氯胺等物质, 一氯胺进一步被氧化成氮, 二氯胺则反应生成硝酸盐, 从而使水中游离氨氮浓度降低^[28-30]. 但是, 4 种消毒技术对 TN 基本没有去除能力 ($P > 0.05$).

同时, 综合图 3 与图 4 中消毒技术对 ARB、COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果, 发现当臭氧浓度、紫外剂量、次氯酸钠浓度依次为 $5.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $45.0 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、 $25.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, ARB 的去除率增速最快, 而继续增加消毒浓度或剂量, ARB 的去除率增速反而降低, 因此本研究将以上浓度视为消毒的最佳浓度或剂量. 而且, 次氯酸钠耦合紫外消毒对 ARB 的去除效果更佳. 污水处理厂实际选用臭氧、紫外、次氯酸钠及次氯酸钠耦合紫外消毒时, 所需成本分别为 0.1 、 $0.02 \sim 0.03$ 、 $0.02 \sim 0.04$ 和 $0.02 \sim 0.04 \text{ 元}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[31], 且污水处理厂处理水量越大消毒处理成本越低, 因此建议该污水处理厂出水消毒处理采用经济合理的次氯酸钠耦合紫外消毒方式, 实现对污水处理厂出水中 ARB、COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的



(a) 为 COD、TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度随臭氧浓度变化的情况; (b) 为 COD、TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度随紫外剂量变化的情况; (c) 为 COD、TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度随次氯酸钠浓度变化的情况; (d) 为在紫外剂量为 $30.0 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的条件下, COD、TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度随次氯酸钠浓度变化的情况

图 4 不同消毒技术对水质指标的去除效果

Fig. 4 Removal efficiency of water quality index by different disinfection processes

强化去除.

3 结论

(1) 污水处理厂出水中含量最多的 ARB 为 AMP, 污水处理厂实际紫外消毒对 ARB 的去除率仅为 18.2% ~ 40.9%.

(2) 4 种消毒技术对 ARB 具有选择性去除效果, 对 ERY 的选择性去除效果较好, 但其他 4 种 ARB 无明显选择性去除效果. 其中 ERY/HPC 由 16.9% 降至 1.4%, CIP/HPC 反而由 1.0% 增至 5.7% ($P < 0.05$).

(3) 确定了不同消毒处理技术的最佳浓度或剂量: 臭氧浓度为 $5.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, ARB 的去除率为 45.5% ~ 74.5%, COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率分别为 32.3% 和 33.1%; 紫外消毒剂量为 $45.0 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时, ARB 的去除率为 68.6% ~ 85.5%, COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率分别为 19.4% 和 11.2%. 次氯酸钠浓度为 $25.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 其对 ARB 的去除率为

66.1% ~ 85.5%, COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率分别为 37.1% 和 26.5%, 同时耦合紫外消毒 ARB 的去除效果更佳.

参考文献:

- [1] 佟娟, 魏源送. 污水处理厂削减耐药菌与抗性基因的研究进展[J]. 环境科学学报, 2012, 32(11): 2650-2659.
Tong J, Wei Y S. State-of-the-art removal of antibiotic resistance bacteria (ARB) and antibiotic resistance gene (ARG) in wastewater treatment plants (WWTPs) [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(11): 2650-2659.
- [2] Rizzo L, Manaia C, Merlin C, et al. Urban wastewater treatment plants as hotspots for antibiotic resistant bacteria and genes spread into the environment: a review [J]. Science of the Total Environment, 2013, 447: 345-360.
- [3] Gao P, Munir M, Xagorarakis I. Correlation of tetracycline and sulfonamide antibiotics with corresponding resistance genes and resistant bacteria in a conventional municipal wastewater treatment plant [J]. Science of the Total Environment, 2012, 421-422: 173-183.
- [4] Munir M, Wong K, Xagorarakis I. Release of antibiotic resistant bacteria and genes in the effluent and biosolids of five wastewater utilities in Michigan [J]. Water Research, 2011, 45(2): 681-693.

- [5] Bouki C, Venieri D, Diamadopoulos E. Detection and fate of antibiotic resistant bacteria in wastewater treatment plants: a review[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, **91**: 1-9.
- [6] Guo M T, Yuan Q B, Yang J. Ultraviolet reduction of erythromycin and tetracycline resistant heterotrophic bacteria and their resistance genes in municipal wastewater [J]. *Chemosphere*, 2013, **93**(11): 2864-2868.
- [7] Oh J, Salcedo D E, Medriano C A, *et al.* Comparison of different disinfection processes in the effective removal of antibiotic-resistant bacteria and genes [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(6): 1238-1242.
- [8] Zhuang Y, Ren H Q, Geng J J, *et al.* Inactivation of antibiotic resistance genes in municipal wastewater by chlorination, ultraviolet, and ozonation disinfection [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(9): 7037-7044.
- [9] 陆孙琴, 李轶, 黄晶晶, 等. 污水处理厂二级出水中总异养菌群对 6 种抗生素的耐受性研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(11): 3419-3424.
- Lu S Q, Li Y, Huang J J, *et al.* Antibiotic resistance of bacteria to 6 antibiotics in secondary effluents of municipal wastewater treatment plants[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(11): 3419-3424.
- [10] Łuczkiwicz A, Jankowska K, Fudala-Książek S, *et al.* Antimicrobial resistance of fecal indicators in municipal wastewater treatment plant [J]. *Water Research*, 2010, **44**(17): 5089-5097.
- [11] 李振, 王云建. 畜禽养殖中抗生素使用的现状、问题及对策[J]. *中国动物保健*, 2009, **11**(7): 55-57.
- [12] Clinical and Laboratory Standards Institute[S].
- [13] 沈萍, 陈向东. 微生物学实验[M]. (第四版). 北京: 高等教育出版社, 2007. 275-276.
- [14] 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. 210-276.
- [15] Xu J, Xu Y, Wang H M, *et al.* Occurrence of antibiotics and antibiotic resistance genes in a sewage treatment plant and its effluent-receiving river [J]. *Chemosphere*, 2015, **119**: 1379-1385.
- [16] Yuan Q B, Guo M T, Yang J. Monitoring and assessing the impact of wastewater treatment on release of both antibiotic-resistant bacteria and their typical genes in a Chinese municipal wastewater treatment plant [J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2014, **16**(8): 1930-1937.
- [17] Yin Q, Yue D M, Peng Y K, *et al.* Occurrence and distribution of antibiotic-resistant bacteria and transfer of resistance genes in lake Taihu [J]. *Microbes and Environments*, 2013, **28**(4): 479-486.
- [18] Gao P P, Mao D Q, Luo Y, *et al.* Occurrence of sulfonamide and tetracycline-resistant bacteria and resistance genes in aquaculture environment [J]. *Water Research*, 2012, **46**(7): 2355-2364.
- [19] Reinthaler F F, Posch J, Feierl G, *et al.* Antibiotic resistance of *E. coli* in sewage and sludge [J]. *Water Research*, 2003, **37**(8): 1685-1690.
- [20] 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.
- [21] Guo M T, Yuan Q B, Yang J. Microbial selectivity of UV treatment on antibiotic-resistant heterotrophic bacteria in secondary effluents of a municipal wastewater treatment plant [J]. *Water Research*, 2013, **47**(16): 6388-6394.
- [22] 邵一如, 席北斗, 曹金玲, 等. 抗生素在城市污水处理系统中的分布及去除 [J]. *环境科学与技术*, 2013, **36**(7): 85-92.
- Shao Y R, Xi B D, Cao J L, *et al.* Occurrence of antibiotics and their removal mechanism in municipal sewage treatment plants [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **36**(7): 85-92.
- [23] Lüddecke F, Heß S, Gallert C, *et al.* Removal of total and antibiotic resistant bacteria in advanced wastewater treatment by ozonation in combination with different filtering techniques [J]. *Water Research*, 2015, **69**: 243-251.
- [24] Martínez S B, Pérez-Parra J, Suay R. Use of ozone in wastewater treatment to produce water suitable for irrigation [J]. *Water Resources Management*, 2011, **25**(9): 2109-2124.
- [25] Vaccari M, Gialdini F, Collivignarelli C. Study of the reuse of treated wastewater on waste container washing vehicles [J]. *Waste Management*, 2013, **33**(2): 262-267.
- [26] 张宝祥, 赵曦, 张亚莉, 等. 二氧化氯对污水厂出水的消毒及综合影响研究 [J]. *中国给水排水*, 2009, **25**(23): 69-71.
- Zhang B X, Zhao X, Zhang Y L, *et al.* Comprehensive analysis on using chlorine dioxide as disinfectant for effluent from wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2009, **25**(23): 69-71.
- [27] 苗婷婷. 氯及臭氧消毒技术对城市污水水质的影响 [D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
- [28] 许国强, 曾光明, 殷志伟, 等. 氨氮废水处理技术现状及发展 [J]. *湖南有色金属*, 2002, **18**(2): 29-33.
- Xu G Q, Zeng G M, Yin Z W, *et al.* Recent advances on the treatment technologies of ammonia-nitrogen wastewater [J]. *Hunan Nonferrous Metals*, 2002, **18**(2): 29-33.
- [29] 顾庆龙. 次氯酸钠氧化法脱除二级生化出水中氨氮的中试研究 [J]. *环境科学与管理*, 2007, **32**(12): 97-99, 147.
- Gu Q L. The pilot trim of ammonia nitrogen removal from secondary treatment effluent by sodium hypochlorite oxidation [J]. *Environmental Science and Management*, 2007, **32**(12): 97-99, 147.
- [30] Zhang Y Y, Zhuang Y, Geng J J, *et al.* Inactivation of antibiotic resistance genes in municipal wastewater effluent by chlorination and sequential UV/chlorination disinfection [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **512-513**: 125-132.
- [31] 濮晨熹. 城市污水处理厂消毒技术应用研究 [D]. 广州: 广州大学, 2012.

CONTENTS

Correlation Analysis of the Urban Heat Island Effect and Its Impact Factors in China	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3987)
Application of Satellite Remote Sensing in NO _x Emission Control	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (3998)
Control Models and Effect Evaluation of Air Pollution in Jing-Jin-Ji Urban Agglomeration	WANG Zhen-bo, LIANG Long-wu, LIN Xiong-bin, <i>et al.</i> (4005)
Pollution Characteristics of Aerosol Number Concentration in Winter and Spring in a Northern Suburb of Nanjing	WU Dan, ZHANG Fan, LIU Gang, <i>et al.</i> (4015)
Source Apportionment and Size Distribution of Aerosols at Lin'an Atmosphere Regional Background Station During Winter	SHI Shuang-shuang, WANG Hong-lei, ZHU Bin, <i>et al.</i> (4024)
Seasonal Variations in Particle Size Distribution and Water-soluble Ion Composition of Atmospheric Particles in Chengdu	TAO Yue-le, LI Qin-kai, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4034)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Quanzhou City	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4044)
Chemical Characteristics and Sources of Heavy Metals in Fine Particles in Beijing in 2011-2012	ZHOU Xue-ming, ZHENG Nai-jia, LI Ying-hong, <i>et al.</i> (4054)
Pollution Assessment and Source Analysis of Metals in PM _{2.5} in Haicang District, Xiamen City, China	ZHAO Li-si, YU Rui-lian, XU Ling-ling, <i>et al.</i> (4061)
Characteristics and Health Risk Assessment of Metallic Elements in PM _{2.5} Fraction of Road Dust	ZHANG Jing, ZHANG Yan-jie, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4071)
Seasonal Variations in PM ₁₀ and Associated Chemical Species in Jiuxian Mountain in Fujian Province	WEI Ya, LIN Chang-cheng, HU Qiong-hua, <i>et al.</i> (4077)
Characteristics of C2-C6 Hydrocarbons During the Winter Air Pollution Period in Beijing Urban Area	LI Yue, WEI Wei, YANG Gan, <i>et al.</i> (4084)
Analysis of Atmospheric Particulate Matter Pollution Characteristics by LIDAR in Beijing During Spring Festival, 2016	SHI Lin-lin, LI Ling-jun, LI Qian, <i>et al.</i> (4092)
Influence Factors and Sensitivity of Ozone Formation in Langfang in the Summer	LI Lei, ZHAO Yu-mei, WANG Xu-guang, <i>et al.</i> (4100)
Impact of Human Activities on Water-Rock Interactions in Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> (4108)
Distinguishing the Properties and Sources of the Dissolved Organic Matter in Karst Reservoir Water During Winter Using Three-Dimensional Fluorescence Spectrum Technology: A Case Study in Wulixia Reservoir of Guangxi Province	LU Xiao-xuan, PENG Wen-jie, LI Qiang, <i>et al.</i> (4120)
Analysis of Temporal and Spatial Variations in Trace Element Migration in Karst Critical Zone: An Example of Jiguan Cave, Henan	LIANG Sha, YANG Yan, ZHANG Na, <i>et al.</i> (4130)
Eutrophication and Characteristics of Cyanobacteria Bloom in the Summer in Guishi Reservoir	GOU Ting, MA Qian-li, WANG Zhen-xing, <i>et al.</i> (4141)
Spatial and Temporal Distribution of Chlorophyll a and Its Relationship to Algae and Environmental Factors in Aha Reservoir	LUO Yi-fu, LI Lei, LI Qiu-hua, <i>et al.</i> (4151)
Spatio-temporal Variations in Phytoplankton Community in Shahe Reservoir, Tianmuhu, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4160)
Spatio-temporal Variations, Contamination and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in the Sediments of Chenghai Lake	YU Zhen-zhen, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (4169)
Characteristics of Phosphorus Output Through Runoff on a Red Soil Slope Under Natural Rainfall Conditions	ZUO Ji-chao, ZHENG Hai-jin, XI Tong-hang, <i>et al.</i> (4178)
Occurrence, Distribution and Health Risk of the Phthalate Esters in Riparian Soil in the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (4187)
Seasonal Distribution, Composition, and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in the Main Stream of the Luanhe River	WANG Yi-zhen, ZHANG Shi-lu, KONG Fan-qing, <i>et al.</i> (4194)
Occurrence and Human Exposure Risk Assessment of Organophosphate Esters in Drinking Water in the Weifang Binhai Economic-Technological Development Area	DONG Zheng, MA Yu-long, LI Jun-qi, <i>et al.</i> (4212)
Contamination Characteristics and Human Exposure to Organophosphate Flame Retardants in Road Dust from Suzhou City	LI Jing, WANG Jun-xia, XU Wan-ting, <i>et al.</i> (4220)
Cancer Risk of Human Intake of PAH-Contaminated Particles Based on Hand-to-Mouth Activities	TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (4228)
Spatio-temporal Evolution of Groundwater Vulnerability Based on Spatial Autocorrelation	LIU Yu, LAN Shuang-shuang, ZHANG Yong-xiang, <i>et al.</i> (4236)
Preparation of Ag-AgI/CN/MA Composites and Their Visible-light Photocatalytic Performance	ZHANG Sai, ZHANG Li-li, HU Chun (4245)
Effect of <i>Eichhornia crassipes</i> on Ammoxidation and Denitrification Microorganisms in Eutrophic Freshwaters	LI Jie, JIANG Li-juan, WANG Xiao-lin, <i>et al.</i> (4253)
Utilization of Copper (II) Wastewater for Enhancing the Treatment of Chromium (VI) Wastewater in Microbial Fuel Cells	XIONG Xiao-min, WU Xia-yuan, JIA Hong-hua, <i>et al.</i> (4262)
Efficiency and Microecology of a Soil Infiltration System with High Hydraulic Loading for the Treatment of Swine Wastewater	SU Cheng-yuan, LIU Fan-fan, ZHONG Yu, <i>et al.</i> (4271)
Effects of Bacteria on the Growth of and Lipid Accumulation in <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivated in Municipal Wastewater	TU Ren-jie, JIN Wen-biao, HAN Song-fang, <i>et al.</i> (4279)
Enhanced Antibiotic Resistant Bacteria Removal from Wastewater Treatment Plant by Different Disinfection Technologies	LIU Ya-lan, MA Cen-xin, DING He-zhou, <i>et al.</i> (4286)
Coking Wastewater Treatment Efficiency and Comparison of Acute Toxicity Characteristics of the AnMBR-A-MBR and A ² -MBR Processes	ZHU Jia-di, LI Fei-fei, CHEN Li-jun (4293)
Stability of the CANON Process Based on Real-Time Control Technologies	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (4302)
Improving Nitrogen and Phosphorus Removal from Reclaimed Water Using a Novel Sulfur/Iron Composite Filler	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> (4309)
Start-up and Capacity Enhancement of a Partial Nitrification Pilot Reactor in Continuous Flow	ZHU Qiang, LIU Kai, DONG Shi-yu, <i>et al.</i> (4316)
Quick Start-up Performance of Combined ANAMMOX Reactor Based on Different Inoculated Sludge Types	LÜ Gang, LI Tian, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (4324)
Effect of Two-Stage Aeration on Nitrogen Removal Performance of Aerobic Granular Sludge	WANG Wen-xiao, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (4332)
Construction of a High Efficiency Anaerobic Digestion System for Vinegar Residue	ZHOU Yun-long, XU Zhi-yang, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (4340)
Comparison of Ecological Risk Assessment Based on the Total Amount and Speciation Distribution of Heavy Metals in Soil: A Case Study for Longyan City, Fujian Province	WANG Rui, CHEN Ming, CHEN Nan, <i>et al.</i> (4348)
Heavy Metal Contamination of Soils and Crops near a Zinc Smelter	CHEN Feng, DONG Ze-qin, WANG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4360)
Characteristics and Influencing Factors of CH ₄ Emissions from the Drawdown Area of the Three Gorges Reservoir	CHAI Xue-si, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (4370)
Effects of Plastic Film Mulching on Nitrous Oxide Emissions from a Vegetable Field	FENG Di, HAO Qing-ju, ZHANG Kai-li, <i>et al.</i> (4380)
Effects of Bamboo Biochar on Greenhouse Gas Emissions During the Municipal Sludge Composting Process	XIANG Qiu-jie, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4390)
Removal of Cd from Soil by <i>Aspergillus fumigatus</i> in a Semi-solid Culture	CHEN Yao-ning, WANG Yuan-nan, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4398)
Removal of Chlortetracycline and Morphological Changes in Heavy Metals in Swine Manure Using the Composting Process	WEN Qin-xue, CAO Yong-sen, CHEN Zhi-qiang (4405)
Remediation of Petroleum-Contaminated Soil Using a Bioaugmented Compost Technique	WU Man-li, CHEN Kai-li, YE Xi-qiong, <i>et al.</i> (4412)
Effects of Microbial Diversity on Soil Carbon Mineralization	AN Li-yun, LI Jun-jian, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4420)
Ozone Deposition and Risk Assessment for a Winter Wheat Field; Partitioning Between Stomatal and Non-stomatal Pathways	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (4427)
Progress in the Studies of Precipitation Chemistry in Acid Rain Areas of Southwest China	ZHOU Xiao-de, XU Zhi-fang, LIU Wen-jing, <i>et al.</i> (4438)