

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

PM_{2.5}污染对我国健康负担和经济损失的影响

李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕

PM_{2.5}

• 中风

PM_{2.5}控制目标
健康经济效益

• 冠心病

• 呼吸系统疾病

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年4月

第42卷 第4期
Vol.42 No.4

目次

京津冀及周边地区秋冬季大气污染物排放变化因素解析	唐倩, 郑博, 薛文博, 张强, 雷宇, 贺克斌 (1591)
珠江三角洲大气光化学氧化剂(O_3)与 $PM_{2.5}$ 复合超标污染特征及气象影响因素	颜丰华, 陈伟华, 常鸣, 王伟文, 刘永林, 钟部卿, 毛敬英, 杨士士, 王雪梅, 刘焯芳 (1600)
广州市臭氧污染溯源:基于拉格朗日光化学轨迹模型的案例分析	裴成磊, 牟江山, 张英南, 申恒青, 陈玉茹, 黄杰生, 丁浩然, 李成柳 (1615)
运城秋冬季大气细粒子化学组成特征及来源解析	赵清, 李杏茹, 王国选, 张兰, 杨阳, 刘永桥, 孙宁宁, 黄禹, 雷文凯, 刘新罡 (1626)
降雪后24 h内大气中多环芳烃的变化规律	范慧泽, 祝富杰, 胡鹏持, 马万里 (1636)
道路扬尘中 $PM_{2.5}$ 粒度乘数的测定方法及特征	李冬, 陈建华, 张月帆, 高忠阳, 高健, 张凯, 竹双 (1642)
铸造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	高爽, 李时蓓, 伯鑫, 李厚宇, 舒木水, 谈默, 屈加豹, 雷团团 (1649)
燃煤电厂和垃圾焚烧电厂燃烧产物中卤代多环芳烃的赋存特征和毒性风险	倪秀峰, 王儒威, 蔡飞旋, 蔡家伟 (1660)
兰州市春季微生物气溶胶浓度、粒径及细菌群落结构分布特性	赵炜, 李杰, 谢慧娜, 张莉红, 王亚娥 (1668)
大气污染排放格局优化方法及案例	李敏辉, 廖程浩, 常树诚, 张永波, 杨柳林, 曾武涛 (1679)
$PM_{2.5}$ 污染对我国健康负担和经济损失的影响	李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕 (1688)
基于多同位素的不同土地利用区域水体硝酸盐源解析	金赞芳, 胡晶, 吴爱静, 李光耀, 张文辽, 李非里 (1696)
新疆叶尔羌河流域地表水水化学特征及控制因素	张杰, 周金龙, 曾妍妍, 涂治, 纪媛媛, 孙英, 雷米 (1706)
漓江流域水体中重金属污染特征及健康风险评价	黄宏伟, 肖河, 王敦球, 席北斗, 孙晓杰, 李洁月, 李向奎 (1714)
近20年来鄱阳湖流域泛滥平原沉积物微量元素含量与污染变化	李括, 杨柯, 彭敏, 刘飞, 杨峥, 赵传冬, 成杭新 (1724)
汾河流域浅层地下水水化学和氢氧稳定同位素特征及其指示意义	刘鑫, 向伟, 司炳成 (1739)
会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析	李军, 邹胜章, 赵一, 赵瑞科, 党志文, 潘民强, 朱丹尼, 周长松 (1750)
贵州威宁草海流域地下水水化学特征及无机碳通量估算	曹星星, 吴攀, 杨诗笛, 刘闪, 廖家豪 (1761)
辽宁典型海域表层海水中在用化学农药浓度水平与潜在生态风险	杜静, 胡超魁, 解怀君, 田甲申, 李爱, 谢晴, 吴金浩, 宋伦 (1772)
辽河流域土壤中微(中)塑料的丰度、特征及潜在来源	韩丽花, 徐笠, 李巧玲, 陆安祥, 殷敬伟, 田佳宇 (1781)
津冀辽地区典型湖库沉积物PAHs污染特征及来源解析	吴鹏, 鲁逸人, 李慧, 郑天娇子, 程云轩, 焦立新 (1791)
环太湖河流及湖体中有机磷酸酯的污染特征和风险评价	张文萍, 张振飞, 郭昌胜, 吕佳佩, 邓洋慧, 张恒, 徐建 (1801)
太湖表层水体典型抗生素时空分布和生态风险评价	丁剑楠, 刘舒娇, 邹杰明, 石溪哲, 邹华, 史红星 (1811)
淮河流域南四湖可挥发性有机物污染特征及风险评价	程云轩, 高秋生, 李捷, 李慧, 吴鹏, 焦立新 (1820)
三亚河沉积物PAHs和PCBs的分布、来源及风险评价	詹咏, 韦婷婷, 叶汇彬, 董滨, 张领军, 黄远东 (1830)
三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析	李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 褚琳, 李朝霞 (1839)
反硝化细菌、硝酸钙和锆改性沸石联用对底泥中氮磷迁移转化的影响及硝态氮释放风险评估	辛慧敏, 李建伟, 詹艳慧 (1847)
锁磷剂联合好氧反硝化菌修复富营养化水体	李炳堂, 周志勤, Ravi Naidu, 胡智泉, 郭大滨, 陈嘉鑫 (1861)
太湖蓝藻胞内有机质的微生物降解	张巧颖, 孙伟, 杜瑛珣, 巩小丽 (1870)
青藏高原拉萨河流域附石藻类群落结构特征及其驱动因子分析	魏俊伟, 李鸿然, 汪兴中, 齐文华, 汪洋, 赵彬洁, 谭香, 张全发 (1879)
基于EEMs与UV-vis分析苏州汛期景观河道中DOM光谱特性与来源	何杰, 朱学惠, 魏彬, 李学艳, 汤如涛, 林欣, 周飞, 司壮壮 (1889)
老化前后轮胎磨损微粒与聚氯乙烯微粒对抗生素的吸附-解吸行为	范秀磊, 邹峰峰, 刘加强, 李莹, 刘强, 侯俊 (1901)
磁性铁基改性生物炭去除水中氨氮	王芳君, 桑倩倩, 邓颖, 赵元添, 杨娅, 陈永志, 马娟 (1913)
城市污水处理厂进水氨氧化菌对活性污泥系统的季节性影响	于莉芳, 汪宇, 滑思思, 李韧, 张兴秀, 惠晓飞 (1923)
基于粒径分化的厌氧氨氧化污泥性能与微生物多样性分析	王晓瞳, 杨宏 (1930)
ClO_2 消毒工艺对污水处理厂出水超级耐药基因的影响	程春燕, 李海北, 梁永兵, 师丹阳, 陈郑珊, 杨栋, 焦巧瑞, 邵一帆, 李君文, 金敏 (1939)
微塑料PES与2,4-DCP复合污染对厌氧污泥胞外聚合物与微生物群落的影响	林旭萌, 宿程远, 吴淑敏, 黄嫒, 邓雪, 林香凤, 黄尊, 魏佳林 (1946)
城镇污水处理厂污泥泥质监测及资源化风险评价	李娟, 李金香, 杨妍妍 (1956)
气候变暖对冻结期黑土碳氮循环关键过程及指标的影响	王子龙, 刘传兴, 姜秋香, 李世强, 柴迅 (1967)
沼液秸秆联用对滨海围垦田土壤重金属迁移及形态变化的影响	王伟, 周珺楠, 汤逸帆, 申建华, 韩建刚 (1979)
地块尺度城市土地质量地球化学调查方法:以雄安新区起步区为例	周亚龙, 郭志娟, 刘飞, 韩伟, 孔牧, 赵传冬, 刘爱涛, 彭敏, 王乔林, 王成文 (1989)
雄安新区农田土壤-农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析	周亚龙, 杨志斌, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟 (2003)
地质背景农田土壤下不同水稻品种对Cd的累积特征及影响因素	代子雯, 方成, 孙斌, 魏志敏, 胡锋, 李辉信, 徐莉 (2016)
不同外源硒对镉污染土壤中小白菜生长及镉吸收的影响	刘杨, 齐明星, 王敏, 刘娜娜, Pornpimol Kleawsampanjai, 周菲, 翟辉, 王梦柯, 任蕊, 梁东丽 (2024)
影响不同农作物镉富集系数的土壤因素	陈洁, 王娟, 王怡雯, 姚启星, 苏德纯 (2031)
Cd胁迫下不同外源植物激素对水稻幼苗抗氧化系统及Cd吸收积累的影响	张盛楠, 黄益宗, 李颜, 保琼莉, 黄永春 (2040)
不同有机物料对水稻根表铁膜及砷镉吸收转运的影响	李开叶, 赵婷婷, 陈佳, 赵秀兰 (2047)
铜尾矿坝及其周边土壤真菌群落结构与功能多样性	陈建文, 张红, 李君剑, 刘勇 (2056)
微生物群落驱动AM真菌、生物炭及联合改良沙化土壤作用潜力	张哲超, 杨久扬, 郝百惠, 郝利君, 罗俊清, 李雪, 刁风伟, 张璟霞, 郭伟 (2066)
动物粪便施肥措施促进耐药基因在粪便-土壤-蔬菜之间的散播	张红娜, 董梦洁, 周玉法, 孙佳欣, 常美洁, 翟真真 (2080)
区域水生态文明建设绩效评价及障碍诊断模型的建立与应用	万炳彤, 鲍学英, 赵建昌, 李爱春 (2089)
《环境科学》征订启事(1738) 《环境科学》征稿简则(1790) 信息(1860, 1878, 1900)	

ClO₂ 消毒工艺对污水处理厂出水超级耐药基因的影响

程春燕, 李海北, 梁永兵, 师丹阳, 陈郑珊, 杨栋, 焦巧瑞, 邵一帆, 李君文, 金敏*

(军事科学院军事医学研究院环境医学与作业医学研究所, 天津市环境与食品安全风险监控技术重点实验室, 天津 300050)

摘要: 为了研究二氧化氯(chlorine dioxide, ClO₂)消毒工艺对污水处理厂出水中超级耐药基因(super antibiotic resistance genes, SARGs)的去除效果,对污水处理厂出水消毒前后的水样进行了全年采集,并采用微孔滤膜正压过滤法及核酸吸附柱-洗脱法分别富集水中细菌和胞外核酸后,利用荧光定量PCR技术对其中的9种SARGs进行定量检测。结果表明,无论是胞内还是胞外核酸,均有NDM-1、MCR-1和MEC-A被检测出;同时,ClO₂消毒后上述3种SARGs的胞内相对总浓度明显上升($P < 0.05$),且ClO₂消毒对胞内SARGs相对浓度的影响与季节有关,其中春季、夏季和秋季均发生上升,且春季升高最为明显,达2倍,而冬季出水在消毒前后均未测出胞内SARGs;胞外SARGs则在ClO₂消毒前后没有明显浓度变化。因此,ClO₂消毒不能有效去除污水处理厂出水中胞内和胞外SARGs污染。

关键词: 污水处理厂(WWTP); 二氧化氯(ClO₂); 消毒; 胞内超级耐药基因(iSARGs); 胞外超级耐药基因(eSARGs)

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)04-1939-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.202008182

Effects of Chlorine Dioxide Disinfection on the Profile of the Super Antibiotic Resistance Genes in a Wastewater Treatment Plant

CHENG Chun-yan, LI Hai-bei, LIANG Yong-bing, SHI Dan-yang, CHEN Zheng-shan, YANG Dong, JIAO Qiao-rui, SHAO Yi-fan, LI Jun-wen, JIN Min*

(Tianjin Key Laboratory of Risk Assessment and Control for Environment & Food Safety, Tianjin Institute of Environmental Medicine and Operational Medicine, Tianjin 300050, China)

Abstract: In order to study the effects of chlorine dioxide (ClO₂) disinfection on the super antibiotic resistance genes (SARGs), the final effluents before and after chlorine dioxide were sampled throughout one year in a wastewater treatment plant (WWTP). The bacteria and extracellular nucleic acid were collected using microporous membrane filtration and nucleic acid adsorption particles, respectively. A total of 9 SARGs was detected through a quantitative real-time polymerase chain reaction (qPCR). The results revealed that both intracellular and extracellular NDM-1, MCR-1, and MEC-A could be positively detected in the samples. Overall, ClO₂ disinfection enhanced the relative abundance of the iSARGs ($P < 0.05$), exhibiting a seasonal pattern, and increasing in the spring, summer, and autumn. In spring, it improved the most, up to twice the abundance. No SARGs were detected positive in the winter, either intracellularly or extracellularly. There was no significant variation in the concentrations of eSARGs before and after ClO₂ disinfection. Therefore, ClO₂ disinfection cannot effectively remove iSARGs and eSARGs in the final effluent from the WWTP.

Key words: wastewater treatment plant (WWTP); chlorine dioxide (ClO₂); disinfection; intracellular super antibiotic resistance genes (iSARGs); extracellular super antibiotic resistance genes (eSARGs)

超级耐药细菌(super antibiotic resistant bacteria, SARB)是一类细菌的总称,对几乎所有抗生素耐药是其最大的特点^[1]。2010年8月,世界卫生组织指出人类将面临SARB的威胁^[2],甚至有人提出SARB如NDM-1细菌10年内将无药可救。SARB产生抗生素耐药性的遗传基础是超级耐药基因(super antibiotic resistance genes, SARGs^[3]),它兼具“可复制传播”的生物特性和“不易消亡或环境持久”的物理化学特性,可在生物体内持续传播^[4]。SARGs在自然界中有两种存在形式:细胞内超级耐药基因(intracellular super antibiotic resistance genes, iSARGs)和细胞外超级耐药基因(extracellular super resistance genes, eSARGs^[5]),其中eSARGs是菌体活体分泌或死亡后释放的,可在水中持久存在^[6]。污

水处理厂(wastewater treatment plants, WWTP)主要是处理居民生活、医疗和畜禽养殖等方面废水,被认为是ARGs的重要储存库,且在整个污水处理过程中各个单元均有ARGs被检测出,同时也是细菌之间发生水平基因转移的高发区^[7]。目前,ARGs已经被定义为一种新型环境污染物^[8],因此深入研究污水处理过程中SARGs的污染特征,对今后有效控制水中SARGs污染有重要意义。

消毒处理对提高WWTP出水的生物安全性具有重要意义,它能够高效杀灭水中多种病菌和病

收稿日期: 2020-08-17; 修订日期: 2020-10-13

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41831287)

作者简介: 程春燕(1994~),女,硕士研究生,主要研究方向为水中超级耐药基因的污染, E-mail: chengchunyan917@126.com

* 通信作者, E-mail: jinminzh@126.com

毒. 然而, 有研究表明消毒过程并不能有效去除 iARGs^[9,10], 而且更为严重的是, 笔者发现 WWTP 出水经二氧化氯 (chlorine dioxide, ClO_2) 消毒后, 16 种 iARGs 的相对浓度升高^[11]. 考虑到 ClO_2 杀菌机制主要与细菌蛋白质变性和渗漏有关, 且已有研究表明, 只有当消毒剂使用浓度远远高于杀菌浓度时, 才会破坏消毒致死细菌释放的质粒及其 ARGs^[12]. 因此, 消毒过程有可能帮助死亡 SARB 释放其 DNA, 成为水体游离的 eSARGs. 目前, 关于 ClO_2 消毒对水中 iSARGs 和 eSARGs 污染的影响, 还未见报道.

本研究对天津市某污水处理厂出水消毒前后的水样分别进行 iSARGs 和 eSARGs 的富集和定量检测, 通过分析 ClO_2 消毒对水中 SARGs 的影响, 探讨 ClO_2 消毒对水中 SARGs 的去除效果, 以期以后 WWTP 消毒工艺的改进提供参考.

1 材料与方法

1.1 主要仪器与试剂

正压过滤器 (海宁市能大过滤设备有限公司)、蠕动泵 (上海安亭科学仪器厂)、ViiA 7Dx 荧光定量 PCR 仪 (美国 ABI 公司) 和台式冷冻高速离心机 (美国 Sigma 公司) 等.

水相微孔过滤膜 (北京北化黎明膜分离技术有限责任公司)、硅胶 (中国昆海公司)、SYBR Green 荧光定量 PCR 试剂盒 (瑞士 Roche 公司)、普通 DNA 产物纯化试剂盒 (北京天根生化科技有限公司) 和 Fast DNA Spin Kit for Soil (美国 MP Bio 公司) 等.

1.2 水样采集

水样采自天津市某 WWTP 出水池, 采集 ClO_2 消毒前 (采样点 1) 和消毒后 (采样点 2) 的水样, 具体如图 1 所示, 消毒池中 ClO_2 使用浓度为 8 ~ 9

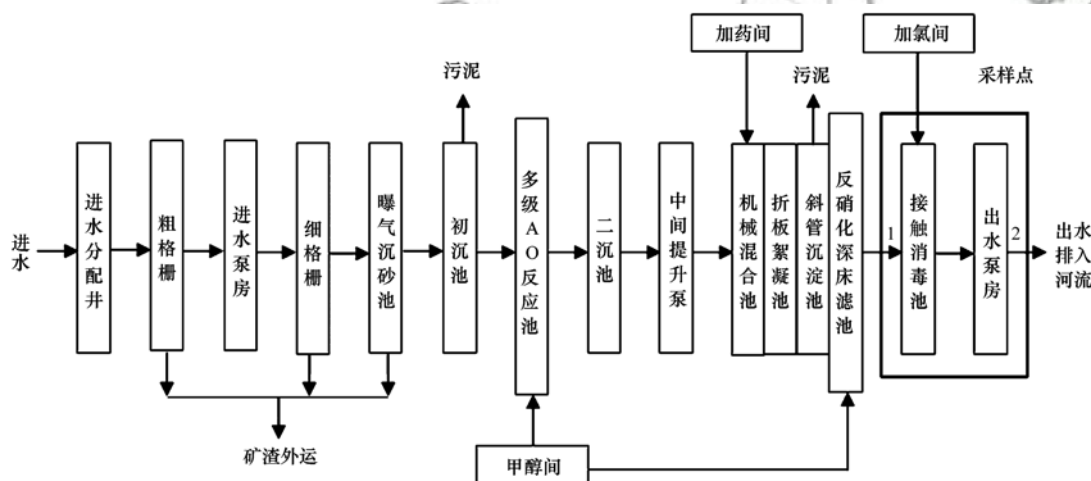


图 1 污水处理厂工艺示意

Fig. 1 Schematic diagram of wastewater treatment in the WWTP

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 消毒后水样中 ClO_2 残留量为 0.07 ~ 0.63 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 采样时间为 2016 年 1 月至 2016 年 12 月, 每月采集水样 3 次 (因 7 月天津持续强暴雨影响, 污水厂水位过高, 未能采样). 采集的水样冷藏条件下迅速送至实验室开展实验.

1.3 细菌的富集和胞内核酸的提取^[11]

将无菌微孔滤膜 (孔径 0.22 μm) 装入正压过滤器, 并通过蠕动泵, 使 20 L 水样匀速 (50 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$) 通过滤膜, 然后将滤膜剪碎并收集到装有 100 mL 3% 牛肉膏洗液的玻璃瓶中, 置于磁力搅拌器上搅拌 30 min (4℃). 将细菌悬液收集到 50 mL 的离心管中, 离心 (4℃, 8 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$, 10 min) 弃上清后, 将细菌沉淀物悬浮于 10 mL PBS 缓冲液中, 置于 -80℃ 保存, 待检测. 细菌 DNA 采用 Fast DNA Spin Kit for Soil 进行提取.

1.4 胞外游离核酸的富集

文献 [13] 将高压灭菌的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 溶液与 60 ~ 100 目的硅胶充分混合, 制备核酸吸附颗粒. 以质粒 *PBR322* 作为内参, 加入到 20 L 水样中, 充分混匀, 使其最终浓度为 20 $\text{copies} \cdot \text{mL}^{-1}$. 利用蠕动泵, 使水样以一定流速 (50 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$) 通过装有 80 ~ 90 g 核酸吸附颗粒的过滤柱 (直径 5 cm), 过滤结束后用 300 mL 洗脱液 (15 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 氯化钠, 30 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 胰蛋白酶, 15 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 牛肉粉, 3.75 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 甘氨酸, 0.28 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 氢氧化钠, pH 9.3 ± 0.2) 洗脱滤柱, 收集洗脱液并加入等体积异丙醇, 室温放置 16 h 后离心 (4℃, 10 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$, 10 min) 弃上清; 75% 乙醇重悬并洗涤沉淀, 离心 (4℃, 10 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$) 5 min 后放置 1 ~ 2 min, 使乙醇充分挥发, 加入 1 mL 无菌 Tris-EDTA 缓冲液 (pH 8.0) 进行重悬后, 利用普通

DNA 产物纯化试剂盒纯化胞外核酸,置于 -80℃ 保存,待检测。

1.5 SARGs 的定量检测

利用荧光定量 PCR 技术 (quantitative real-time polymerase chain reaction, qPCR) 检测 9 种 SARGs. 其中,耐碳青霉烯类基因包括 *NDM-1*、

KPC、*IMP*、*VIM* 和 *OXA-48*; 耐万古霉素类基因包括 *VAN-B*; 耐多粘菌素类基因包括 *MCR-1*; 耐甲氧西林类基因包括 *MEC-A* 和 *FEM-A*. SARGs 标准曲线的建立方法参照文献[14]. 各种 SARGs 的引物及标准品均由上海生工生物工程有限公司合成(表 1).

表 1 本文所用的检测引物¹⁾
Table 1 Primers used in this study

耐药基因	序列(5'→3')	长度/bp	靶向抗生素	参考文献
<i>NDM-1</i>	F:GGCCACACCACTGACAATATCA; R:CAGGCAGCCACCAAAGC	66	碳青霉烯类	[15]
<i>KPC</i>	F:CGCAACTGTAAGTTACCG; R:CATGCCTGTTGTCAGATA	187	碳青霉烯类	[16]
<i>IMP</i>	F:GGCGAATAGAGTGGCTTAATTCTC; R:CGTACGGTTTAACAAAACAACCACC	241	碳青霉烯类	[17]
<i>VIM</i>	F:CGCGGAGATTGAGAAGCAAA; R:AGCCGCCGAAGGACATC	100	碳青霉烯类	[18]
<i>OXA-48</i>	F:GTAGCAAAGGAATGGCAA; R:CCTTGCTGCTTATTGTCA	101	碳青霉烯类	[19]
<i>VAN-B</i>	F:GCAGGACAATATGATGGAAG; R:CCGACAATCAAATCATCCTC	98	万古霉素类	[20]
<i>MCR-1</i>	F:TCAGCAGTCATTATGCCAG; R:ATACTCAATACTGGCAAGC	107	多粘菌素类	[21]
<i>MEC-A</i>	F:CGCAACGTTCAATTTAATTTTGTTAA; R:TGCTCTTTCTGCATTCTCTGGA	92	甲氧西林类	[19]
<i>FEM-A</i>	F:TGCCTTTACAGATAGCATGCCA; R:AGTAAGTAAGCAAGCTGCAATGACC	142	甲氧西林类	[22]
<i>PBR322</i>	F:TTACCCCATGAACAGAAATCC; R:ATGTTAAGGGCGGTTTTTCC	73	—	[23]
16S rDNA	F:CCACGCCGTAACGATGTCTA; R:CCAGGCGCTCTACTTAACGCGT	81	—	[24]

1) F 代表上游引物 (forward primer), R 代表下游引物 (reverse primer)

qPCR 反应体系包括 FastStart Universal SYBR Green Master (Rox) 10 μL, 基因上下游引物 (10 μmol·L⁻¹) 各 0.4 μL, 模板 2 μL, 无酶水补至 20 μL. 反应条件:50℃ 2 min; 95℃ 10 min; 95℃ 15 s, 60℃ 60 s, 40 个循环. 每批次反应均设置阳性对照 (SARGs 阳性标准品为模板) 和阴性对照 (以无酶水为模板), 每个基因检测 3 次.

1.6 水中 eSARGs 浓度的计算

为保证水样 eSARGs 浓度的准确计算, 将 *PBR322* 作为内参, 加入到待测水样中, 利用 qPCR 检测其富集前后的浓度, 确定其回收率^[11]. 胞外核酸回收率和 eSARGs 实际浓度的计算参照公式 (1) 和 (2):

核酸回收率 = $\frac{B - C}{A - C} \times 100\%$ (1)

式中, *A* 为水样里 *PBR322* 的实际加标总拷贝数 (copies), *B* 为浓集液中 *PBR322* 的拷贝数 (copies), *C* 是水样中 *PBR322* 的背景拷贝数 (copies).

eSARGs 实际浓度 = $\frac{D}{\text{核酸回收率}}$ (2)

式中, *D* 为利用 qPCR 测得的水样 eSARGs 浓度 (copies·L⁻¹).

1.7 数据统计与分析

用 SPSS 18.0 (SPSS Inc., Chicago, Illinois) 软件进行统计学分析, 利用 Origin 9.6 (Microcal Software, USA) 进行作图. 数据满足正态性要求的 (比较消毒前后变化) 用 Paired-Sample *t* 检验, 数据不满足正态

性要求的 (比较消毒前后变化) 用 Wilcoxon 检验, 比较多个独立样本的分布差异用 Kruskal-Wallis *H* 检验, *P* < 0.05 为差异有统计学意义.

2 结果与讨论

2.1 ClO₂ 消毒对水中 SARGs 检出频率的影响

将 WWTP 出水 ClO₂ 消毒前后的水样同时进行 iSARGs 和 eSARGs 检测, 结果显示 (表 2), 仅有 *NDM-1*、*MCR-1* 和 *MEC-A* 这 3 种 SARGs 被不同程度检出, 而其它 6 种 SARGs 均未被检出. 对于 iSARGs, 消毒后水样的 *MCR-1* 和 *MEC-A* 检出率较消毒前均发生了下降; 在 eSARGs 中, 可发现 *MEC-A* 的检出率在消毒后出现了上升, 由消毒前的 45% 变为消毒后的 55%. 曹振华等在南京地区污水厂的出水中, 也检出 *MCR-1* 和 *NDM-1* 污染^[14], 以上结

表 2 污水处理厂超级耐药基因的检出率 (*n* = 33) / %

SARGs	iSARGs		eSARGs	
	消毒前	消毒后	消毒前	消毒后
<i>NDM-1</i>	27	27	100	82
<i>KPC</i>	0	0	0	0
<i>IMP</i>	0	0	0	0
<i>VIM</i>	0	0	0	0
<i>OXA-48</i>	0	0	0	0
<i>VAN-B</i>	0	0	0	0
<i>MCR-1</i>	64	36	64	64
<i>MEC-A</i>	64	55	45	55
<i>FEM-A</i>	0	0	0	0

果表明目前的污水处理工艺无法有效去除 *MCR-1*、*NDM-1* 和 *MEC-A* 等 SARGs。

2.2 ClO_2 消毒对水中 iSARGs 的组成及其浓度的影响

将全年收集的所有水样进行统计分析, 观察 ClO_2 消毒对水中 iSARGs 的影响[图 2(a)]. 结果表明, 未经 ClO_2 消毒时, 水中 *NDM-1*、*MCR-1* 和 *MEC-A* 的平均相对总浓度为 1.86, 经过 ClO_2 消毒后, 胞内平均相对总浓度发生明显上升 ($P < 0.05$), 达到 3.52, 较消毒前提高 1.89 倍[图 2(a)]. 进一步观察可发现, 经过 ClO_2 消毒后的 3 种基因中, 以 *MEC-A* 上升最明显 ($P < 0.05$), 相对浓度达到 0.4, 较消毒前提高 7 倍, *NDM-1* 和 *MCR-1* 相对浓度在消毒后具

有上升的趋势, 但没有显著性差异 ($P > 0.05$). 以上结果说明 ClO_2 消毒具有促进水中 iSARGs 污染的作用. Liu 等^[11]的研究也发现 ClO_2 消毒会增加 iSARGs 的丰度, 相对浓度最高可增加 7.8 倍, 而 Shi 等^[25]根据宏基因组测序, 发现氯化过程会提高 *ampC* 和 *tetA* 丰度. 该现象可能与细菌消毒剂抗性/抗生素耐药性的共选择有关^[12], 也可能与消毒导致细菌死亡释放 ARGs, 而 ARGs 可转化存活损伤细菌导致 iSARGs 浓度升高有关, 另外, 氯剂量不足下的耐药质粒结合转移提升也可能与之有关^[26]. 因此, 为了控制水环境中 SARB 的传播和扩散, 目前的污水处理厂 ClO_2 消毒工艺有待进一步提高.

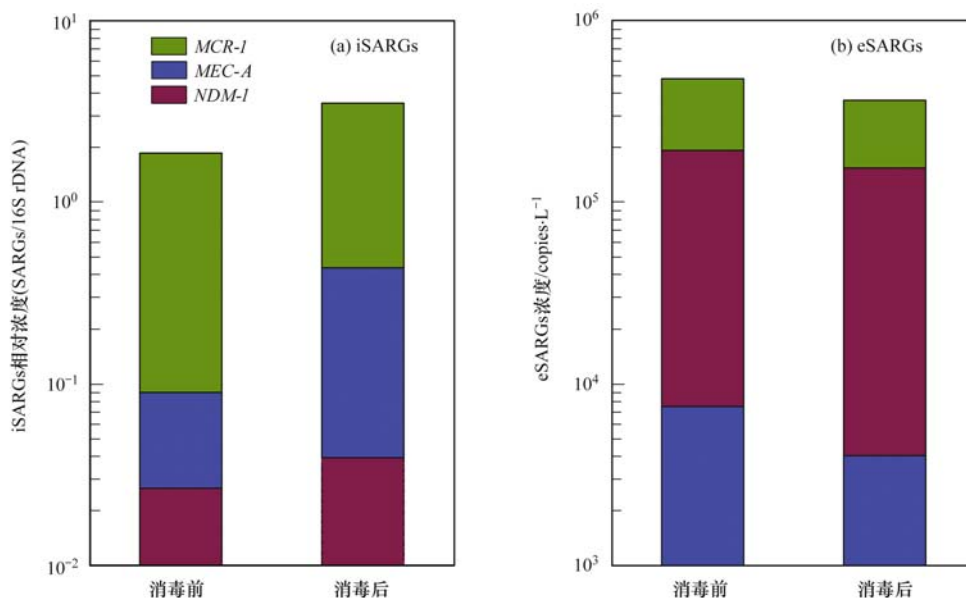


图 2 全年污水处理厂出水中超级耐药基因浓度变化 ($n=33$)

Fig. 2 Change in the concentration of SARGs in the WWTP throughout the year

结果还显示, 对于消毒前 *NDM-1*、*MCR-1* 和 *MEC-A* 呈阳性的水样, ClO_2 消毒后的相对浓度发生显著性变化 ($P < 0.05$), 其中既有相对浓度增加的现象, 也有相对浓度减少的个例[图 3(a)], 对于 *MEC-A*, 100% 阳性水样发生增加 ($P < 0.05$), 最高提高倍数为 8 倍(8 月); 对于 *MCR-1* 和 *NDM-1*, 分别为 86% 和 66% 阳性水样发生增加, 但均无显著性差异 ($P > 0.05$). 值得关注的是, *MEC-A* 在 9 和 11 月的消毒前水样中未测出, 但在消毒后其浓度分别达到 0.04 和 0.1.

进一步研究不同时间段 ClO_2 消毒对水中 iSARG 组成的影响[图 4(a)], 结果表明, iSARGs 的检出时间分布于 4~11 月, 而其它时间点均无检出. 同时, *NDM-1* 只出现在 4~6 月, 平均相对浓度由消毒前的 0.008, 变为消毒后的 0.013, *MEC-A* 和 *MCR-1* 均出现在 4~11 月, 平均相对浓度分别由消

毒前的 0.009 和 0.25, 变为消毒后的 0.057 和 0.44. 因此, 对于污水处理厂消毒后的水样, 除 12 月和 1~3 月未被检测出, 4~6 月的 iSARGs 种类最丰富, 包含 *NDM-1*、*MCR-1* 和 *MEC-A*, 而其他月份只含有 2 种上述 iSARGs.

2.3 ClO_2 消毒对水中 eSARGs 的组成及其浓度的影响

将全年收集的所有水样进行统计分析, 观察 ClO_2 消毒对水中 eSARGs 的影响[图 2(b)]. 结果表明, 未经 ClO_2 消毒时, 水中胞外 *NDM-1*、*MCR-1* 和 *MEC-A* 总浓度平均为 $4.80 \times 10^5 \text{ copies} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中 *MCR-1* 浓度最高, 为 $2.86 \times 10^5 \text{ copies} \cdot \text{L}^{-1}$, *MEC-A* 最低, 仅有 $7.55 \times 10^3 \text{ copies} \cdot \text{L}^{-1}$. 经 ClO_2 消毒后, 水中胞外 *NDM-1*、*MCR-1* 和 *MEC-A* 总浓度平均与消毒前无显著性差异 ($P > 0.05$), 为 $3.65 \times 10^5 \text{ copies} \cdot \text{L}^{-1}$. 结果还显示[图 3(b)], 对于消毒前呈

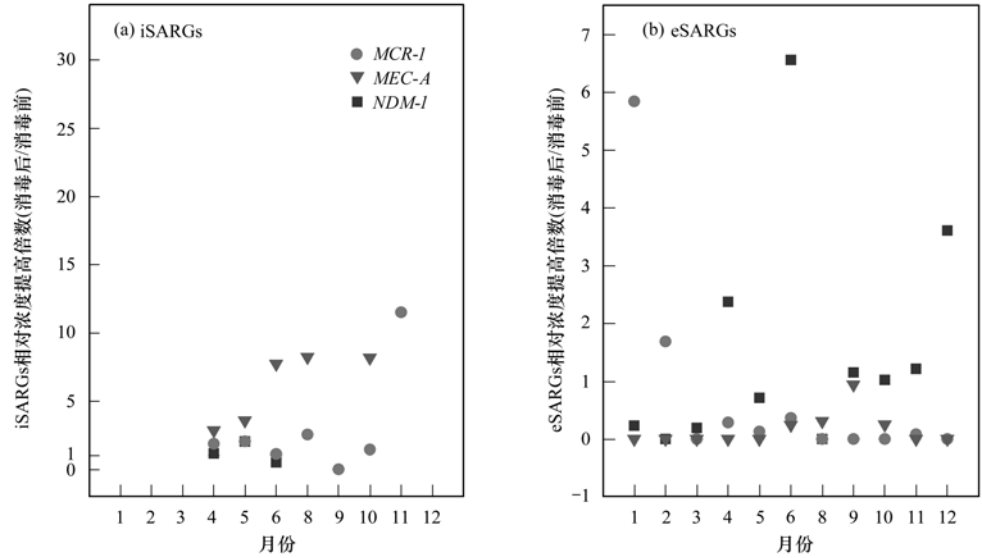


图3 ClO₂ 消毒后水中超级耐药基因浓度的提高倍数 ($n=3$)

Fig. 3 Change in the concentration of SARGs in the water before and after ClO₂ disinfection

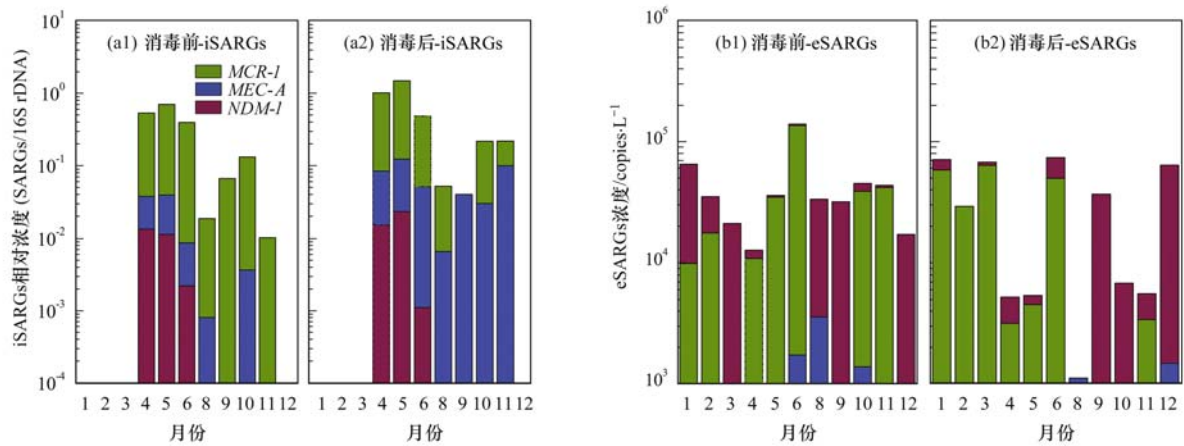


图4 每月污水处理厂出水中超级耐药基因的组成及其浓度 ($n=3$)

Fig. 4 Compositions and concentrations of SARGs in the WWTP by month

NDM-1 阳性的水样,有 55% 发生显著增加 ($P < 0.05$),提高倍数最高为 6.5 倍.对于消毒前呈 *MCR-1* 阳性的水样,有 28% 发生增加,但无显著性差异 ($P > 0.05$).同时还发现,*MCR-1* 在 3 月未消毒水样中没有被检测出,但消毒后浓度增加至 6.34×10^4 copies·L⁻¹,而 *MEC-A*,在 12 月未消毒水样中没有被检测出,消毒后水样中其浓度为 1.46×10^3 copies·L⁻¹.水中 eSARGs 的污染与细菌死亡释放的核酸有关,据报道,即使 ARB 通过消毒完全失活,其释放的质粒仍可在水中持久存在且保持转化功能,在一定条件下,它们可以转化自然感受态细菌而进入细菌,导致抗生素耐药性的水平转移和扩散^[12].另外,不同 eSARGs 对消毒剂的抵抗能力不同,可能是它们在水中污染种类和丰度呈多态性的主要原因.

进一步研究不同时间段 ClO₂ 消毒对水中

eSARGs 组成的影响[图 4(b)],结果显示,经过 ClO₂ 消毒后, *NDM-1* 在 1、3、4、5、6、9、10、11 和 12 月被检测出,平均浓度由消毒前的 1.53×10^4 copies·L⁻¹,变为消毒后的 1.67×10^4 copies·L⁻¹,而 *MEC-A* 出现在 1、6、8、9、10 和 12 月[1、6、9 和 10 月因浓度较低,图 4(b)未显示],平均浓度由消毒前的 1.18×10^3 copies·L⁻¹,变为消毒后的 6.74×10^2 copies·L⁻¹,*MCR-1* 出现在 1、2、3、4、5、6 和 11 月,平均浓度由消毒前的 3.55×10^4 copies·L⁻¹,变为消毒后的 3.01×10^4 copies·L⁻¹.由上可观察到,水样经消毒后,全年所有月份均检出 eSARGs,其中 1 月和 6 月的 eARGs 最丰富,可检出 *NDM-1*、*MCR-1* 和 *MEC-A*,而其它时间,只能检出 1~2 种.

2.4 不同季节 ClO₂ 消毒对水中 SARGs 浓度的影响

根据消毒时间所处季节,观察 ClO₂ 消毒对水中 iSARGs 的影响[图 5(a)].结果显示,未经 ClO₂ 消

毒时, iSARGs 平均相对总浓度在春季最高, 为 1.23, 其次是夏季和秋季, 分别为 0.42 和 0.21. 经 ClO_2 消毒后, 春季、夏季和秋季的 iSARGs 平均相对总浓度均发生上升, 其中春季达到一年中的最高值, 为 2.46, 与消毒前相比, 春季 iSARGs 平均相对总浓度升高 2 倍 ($P < 0.05$). 值得关注的是, 冬季的水样不管消毒与否均未检出 iSARGs, 暗示 SARB 可能在冬季流行相对较弱, Yuan 等^[27] 的研究也指出季节对于污水处理厂的 ARB 释放负荷有相当大影响, 其在冬季释放负荷极低. 进一步研究不同季节 ClO_2 消毒对各个基因相对浓度的影响[图 5(a)], 可观察到, 在春季, 以 *NDM-1* 相对浓度增加倍数最大, 由消毒前的 0.01, 变为消毒后的 0.038, 提高 3.8 倍 ($P > 0.05$); 在夏季, 以 *MEC-A* 相对浓度增加倍数最大, 由消毒前的 0.007, 变为消毒后的 0.013, 提高 1.86 倍 ($P > 0.05$); 在秋季, 以 *MEC-A* 相对浓度增加倍数最大, 由消毒前的 0.004, 变为消毒后的 0.037, 提高 9.25 倍 ($P > 0.05$). 贺赞等^[28] 的研究也发现不

同季节污水处理厂处理效果不同, 其优势菌属也存在差异. 因此, 污水处理厂出水中 iSARGs 的污染种类和浓度与季节密切相关, 且与 ClO_2 消毒过程息息相关.

对全年收集的所有水样进行统计分析, 观察不同季节 ClO_2 消毒对水中 eSARGs 的影响[图 5(b)]. 结果显示, 未经 ClO_2 消毒时, eSARGs 总浓度平均在夏季达到最高, 为 $1.76 \times 10^5 \text{ copies} \cdot \text{L}^{-1}$, 其次是秋季和冬季, 最低是春季, 其总浓度平均为 $6.85 \times 10^4 \text{ copies} \cdot \text{L}^{-1}$. 经 ClO_2 消毒后, 总浓度平均在冬季达到最高, 为 $1.63 \times 10^5 \text{ copies} \cdot \text{L}^{-1}$, 其次是春季和夏季, 最低是秋季, 其总浓度平均为 $4.88 \times 10^4 \text{ copies} \cdot \text{L}^{-1}$. 但是, 经统计学分析, 各季节的 eSARGs 总浓度在消毒前后并无显著性差异 ($P > 0.05$). 进一步研究各个基因在不同季节的变化[图 5(b)], 可观察到各个基因总浓度在消毒前后均无显著性差异 ($P > 0.05$). 以上结果表明, ClO_2 消毒对水中 eSARGs 的影响与温度无关.

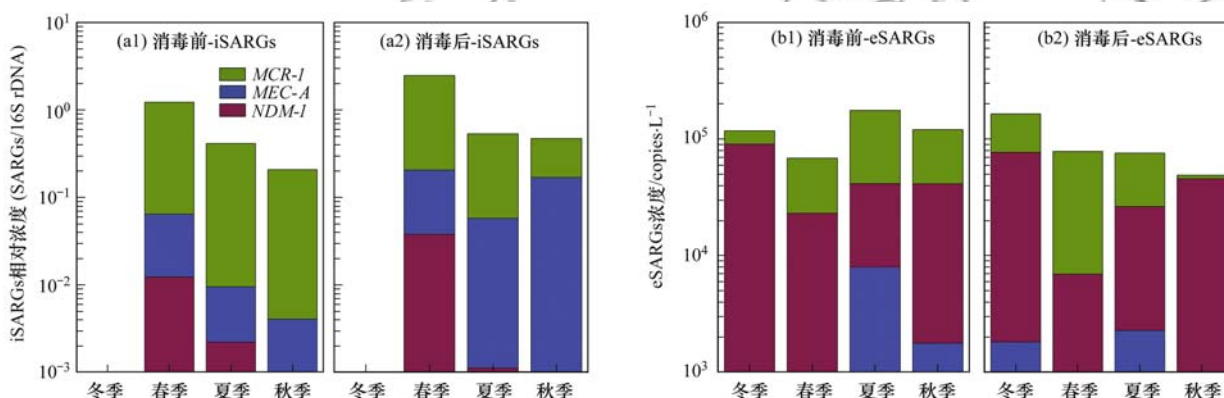


图 5 不同季节污水处理厂出水中超级耐药基因浓度 ($n=9$)

Fig. 5 Concentrations of SARGs in the WWTP in different seasons

3 结论

(1) WWTP 出水消毒后, 仍可检出胞内和胞外 *NDM-1*、*MCR-1* 和 *MEC-A* 等 SARGs, 其中, iSARGs 在 4~6 月, 而 eSARGs 在 1 月和 6 月可同时检出上述 3 种 SARGs.

(2) 经 ClO_2 消毒后, WWTP 出水的胞内 *NDM-1*、*MCR-1* 和 *MEC-A* 平均相对总浓度显著提升, 且 *MEC-A* 提高倍数达 7 倍; ClO_2 消毒对 iSARGs 相对浓度的影响与季节有关, iSARGs 相对总浓度在春季、夏季和秋季均发生上升, 且春季升高最为明显, 达 2 倍, 而冬季出水在消毒前后均未测出 iSARGs.

(3) 经 ClO_2 消毒后, WWTP 出水的胞外 *NDM-1*、*MCR-1* 和 *MEC-A* 总浓度平均未明显变化.

参考文献:

[1] 张锦红, 江涛, 曾昭智. 预防“超级细菌”的滋长-合理规划

使用抗生素[J]. 国外医药(抗生素分册), 2011, 32(1): 46-48.

[2] 赵晖. 面对“超级耐药基因”, 重视头孢菌素临床运用价值[J]. 中国社区医师, 2010, 26(41): 15.

[3] 文汉卿, 史俊, 寻昊, 等. 抗生素抗性基因在水环境中的分布、传播扩散与去除研究进展[J]. 应用生态学报, 2015, 26(2): 625-635.

Wen H Q, Shi J, Xun H, et al. Distribution, dissemination and removal of antibiotic resistant genes (ARGs) in the aquatic environment[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(2): 625-635.

[4] 徐冰洁, 罗义, 周启星, 等. 抗生素抗性基因在环境中的来源、传播扩散及生态风险[J]. 环境化学, 2010, 29(2): 169-178.

Xu B J, Luo Y, Zhou Q X, et al. Sources, dissemination, and ecological risks of antibiotic resistances genes (ARGs) in the environment[J]. Environmental Chemistry, 2010, 29(2): 169-178.

[5] Zhang Y P, Snow D D, Parker D, et al. Intracellular and extracellular antimicrobial resistance genes in the sludge of

- livestock waste management structures [J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(18): 10206-10213.
- [6] Mao D Q, Luo Y, Mathieu J, *et al.* Persistence of extracellular DNA in river sediment facilitates antibiotic resistance gene propagation[J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(1): 71-78.
- [7] 苗雨. 抗生素抗性基因在污水处理系统和消毒工艺中的行为特性[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [8] Pruden A, Pei R T, Storteboom H, *et al.* Antibiotic resistance genes as emerging contaminants: studies in northern Colorado [J]. Environmental Science & Technology, 2006, **40**(23): 7445-7450.
- [9] Yuan Q B, Guo M T, Yang J. Fate of antibiotic resistant bacteria and genes during wastewater chlorination: implication for antibiotic resistance control[J]. PLoS One, 2015, **10**(3), doi: 10.1371/journal.pone.0119403.
- [10] Hu Y R, Zhang T Y, Jiang L, *et al.* Occurrence and reduction of antibiotic resistance genes in conventional and advanced drinking water treatment processes [J]. Science of the Total Environment, 2019, **669**: 777-784.
- [11] Liu S S, Qu H M, Yang D, *et al.* Chlorine disinfection increases both intracellular and extracellular antibiotic resistance genes in a full-scale wastewater treatment plant [J]. Water Research, 2018, **136**: 131-136.
- [12] Jin M, Liu L, Wang D N, *et al.* Chlorine disinfection promotes the exchange of antibiotic resistance genes across bacterial genera by natural transformation[J]. The ISME Journal, 2020, **14**(7): 1847-1856.
- [13] Wang D N, Liu L, Qiu Z G, *et al.* A new adsorption-elution technique for the concentration of aquatic extracellular antibiotic resistance genes from large volumes of water [J]. Water Research, 2016, **92**: 188-198.
- [14] 曹振华, 张媛, 马奔, 等. 南京地区污水厂、自来水厂及长江中抗性基因 *MCR-1* 和 *NDM-1* 的污染特征[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(3): 406-414.
- Cao Z H, Zhang Y, Ma B, *et al.* Pollution characteristics of *MCR-1* and *NDM-1* in wastewater treatment plants, waterworks and Yangtze river of Nanjing section [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(3): 406-414.
- [15] McGann P, Hang J, Clifford R J, *et al.* Complete sequence of a novel 178-kilobase plasmid carrying *bla*_{NDM-1} in a *Providencia stuartii* strain isolated in Afghanistan[J]. Antimicrobial Agents and Chemotherapy, 2012, **56**(4): 1673-1679.
- [16] Zheng F, Sun J J, Cheng C C, *et al.* The establishment of a duplex real-time PCR assay for rapid and simultaneous detection of *bla*_{NDM} and *bla*_{KPC} genes in bacteria[J]. Annals of Clinical Microbiology and Antimicrobials, 2013, **12**(1): 30.
- [17] van der Zee A, Roorda L, Bosman G, *et al.* Multi-centre evaluation of real-time multiplex PCR for detection of carbapenemase genes OXA-48, VIM, IMP, NDM and KPC[J]. BMC Infectious Diseases, 2014, **14**(1): 27.
- [18] Bordin A, Trembizki E, Windsor M, *et al.* Evaluation of the SpeedX Carba (beta) multiplex real-time PCR assay for detection of NDM, KPC, OXA-48-like, IMP-4-like and VIM carbapenemase genes[J]. BMC Infectious Diseases, 2019, **19**(1): 571.
- [19] Naas T, Cotellon G, Ergani A, *et al.* Real-time PCR for detection of *bla*_{OXA-48} genes from stools [J]. Journal of Antimicrobial Chemotherapy, 2013, **68**(1): 101-104.
- [20] Adams D N. Shortcut detection of the *vanB* gene cluster in enterococci by a duplex real-time PCR assay [J]. Pathology, 2006, **38**(4): 349-352.
- [21] Daniels J B, Campbell D, Boyd S, *et al.* Development and validation of a clinical laboratory improvement amendments-compliant multiplex real-time PCR assay for detection of *mer* genes[J]. Microbial Drug Resistance, 2019, **25**(7): 991-996.
- [22] Johnson E J, Zemanick E T, Accurso F J, *et al.* Molecular identification of *Staphylococcus aureus* in airway samples from children with cystic fibrosis[J]. PLoS One, 2016, **11**(1), doi: 10.1371/journal.pone.0147643.
- [23] 董莲华, 隋志伟, 王晶, 等. 数字 PCR 方法准确测量质粒 DNA 拷贝浓度[J]. 计量学报, 2017, **38**(2): 247-251.
- Dong L H, Sui Z W, Wang J, *et al.* Accurate plasmid DNA copy concentration quantification by digital PCR[J]. Acta Metrologica Sinica, 2017, **38**(2): 247-251.
- [24] Crisafi F, Denaro R, Genovese M, *et al.* Comparison of 16S rDNA and *toxR* genes as targets for detection of *Vibrio anguillarum* in *Dicentrarchus labrax* kidney and liver [J]. Research in Microbiology, 2011, **162**(3): 223-230.
- [25] Shi P, Jia S Y, Zhang X X, *et al.* Metagenomic insights into chlorination effects on microbial antibiotic resistance in drinking water[J]. Water Research, 2013, **47**(1): 111-120.
- [26] Guo M T, Yuan Q B, Yang J. Distinguishing effects of ultraviolet exposure and chlorination on the horizontal transfer of antibiotic resistance genes in municipal wastewater [J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(9): 5771-5778.
- [27] 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.
- [28] 贺赞, 李魁晓, 王佳伟, 等. 不同季节城市污水处理厂微生物群落特性[J]. 环境科学, 2021, **42**(3): 1488-1495.
- He Y, Li K X, Wang J W, *et al.* Microbial community structure of waste water treatment plants in different seasons [J]. Environmental Science, 2021, **42**(3): 1488-1495.

CONTENTS

Contributors to Air Pollutant Emission Changes in Autumn and Winter in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	TANG Qian, ZHENG Bo, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (1591)
Characteristics and Meteorological Factors of Complex Nonattainment Pollution of Atmospheric Photochemical Oxidant (O_x) and $PM_{2.5}$ in the Pearl River Delta Region, China	YAN Feng-hua, CHEN Wei-hua, CHANG Ming, <i>et al.</i> (1600)
Source Apportionment of Ozone Pollution in Guangzhou; Case Study with the Application of Lagrangian Photochemical Trajectory Model	PEI Cheng-lei, MU Jiang-shan, ZHANG Ying-nan, <i>et al.</i> (1615)
Chemical Composition and Source Analysis of $PM_{2.5}$ in Yuncheng, Shanxi Province in Autumn and Winter	ZHAO Qing, LI Xing-ru, WANG Guo-xuan, <i>et al.</i> (1626)
Temporal Trend of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere Within 24 Hours After Snowfall	FAN Hui-ze, ZHU Fu-jie, HU Peng-tuan, <i>et al.</i> (1636)
Determination Method and Characteristics of Particle Size Multiplier of $PM_{2.5}$ in Road Dust	LI Dong, CHEN Jian-hua, ZHANG Yue-fan, <i>et al.</i> (1642)
Source Profiles and Impact of VOCs Based on Production Processes in Foundry Industries	GAO Shuang, LI Shi-bei, BO Xin, <i>et al.</i> (1649)
Emission Characteristics and Toxicity Effects of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Coal-Fired and Waste Incineration Power Plants	NI Xiu-feng, WANG Ru-wei, CAI Fei-xuan, <i>et al.</i> (1660)
Concentration and Particle Size Distribution Characteristics of Microbial Aerosol and Bacterial Community Structure During Spring in Lanzhou City, China	ZHAO Wei, LI Jie, XIE Hui-na, <i>et al.</i> (1668)
Optimization Method and Case Study of Air Pollution Emission Spatial Pattern	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, CHANG Shu-cheng, <i>et al.</i> (1679)
Influence of $PM_{2.5}$ Pollution on Health Burden and Economic Loss in China	LI Yong, LIAO Qin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1688)
Identify the Nitrate Sources in Different Land Use Areas Based on Multiple Isotopes	JIN Zan-fang, HU Jing, WU Ai-jing, <i>et al.</i> (1696)
Hydrochemical Characteristic and Their Controlling Factors in the Yarkant River Basin of Xinjiang	ZHANG Jie, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (1706)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Water of Lijiang River Basin	HUANG Hong-wei, XIAO He, WANG Dun-qiu, <i>et al.</i> (1714)
Changes in Concentrations and Pollution Levels of Trace Elements of Floodplain Sediments of Poyang Lake Basin in Recent Twenty Years	LI Kuo, YANG Ke, PENG Min, <i>et al.</i> (1724)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Shallow Groundwater of the Fenhe River Basin and Indicative Significance	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (1739)
Major Ionic Characteristics and Factors of Karst Groundwater at Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (1750)
Hydrochemistry Characteristics and Estimation of the Dissolved Inorganic Carbon Flux in the Caohai Lake Wetland Catchment of Guizhou Province	CAO Xing-xing, WU Pan, YANG Shi-di, <i>et al.</i> (1761)
Concentration Levels and Potential Ecological Risks of Current Use Pesticides in the Surface Seawater of Typical Liaoning Sea Areas	DU Jing, HU Chao-kui, XIE Hua-jun, <i>et al.</i> (1772)
Levels, Characteristics, and Potential Source of Micro(meso)plastic Pollution of Soil in Liaohe River Basin	HAN Li-hua, XU Li, LI Qiao-ling, <i>et al.</i> (1781)
PAHs Pollution Characteristics and Source Analysis of Typical Lake and Reservoir Sediments in Jin-Ji-Liao Area	WU Peng, LU Yi-ren, LI Hui, <i>et al.</i> (1791)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Rivers and Water Body Around Taihu Lake	ZHANG Wen-ping, ZHANG Zhen-fei, GUO Chang-sheng, <i>et al.</i> (1801)
Spatiotemporal Distributions and Ecological Risk Assessments of Typical Antibiotics in Surface Water of Taihu Lake	DING Jian-nan, LIU Shu-jiao, ZOU Jie-ming, <i>et al.</i> (1811)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Pollution and Risk Assessment of Nansi Lake in Huaihe River Basin	CHENG Yun-xuan, GAO Qiu-sheng, LI Jie, <i>et al.</i> (1820)
Distribution, Source, and Ecological Risk Evaluation of the PAHs and PCBs in the Sediments from Sanya River	ZHAN Yong, WEI Ting-ting, YE Hui-bin, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Change and Source Apportionment of Non-point Source Nitrogen and Phosphorus Pollution Loads in the Three Gorges Reservoir Area	LI Ming-long, JIA Meng-dan, SUN Tian-cheng, <i>et al.</i> (1839)
Effect of the Combined Use of Denitrifying Bacteria, Calcium Nitrate, and Zirconium-Modified Zeolite on the Mobilization of Nitrogen and Phosphorus in Sediments and Evaluation of Its Nitrate-Nitrogen Releasing Risk	XIN Hui-min, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui (1847)
Combined Remediation of Eutrophic Water by Phoslock® and Aerobic Denitrifying Bacteria	LI Bing-tang, ZHOU Zhi-qin, Ravi Naidu, <i>et al.</i> (1861)
Biodegradation of Algae-derived Organic Matter (I-DOM) from Lake Taihu	ZHANG Qiao-ying, SUN Wei, DU Ying-xun, <i>et al.</i> (1870)
Structure Characteristics and Driving Variables of Epilithic Algae Community in Lhasa River Basin of Qinghai-Tibet Plateau	WEI Jun-wei, LI Hong-ran, WANG Xing-zhong, <i>et al.</i> (1879)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter from Landscape River During Flood Season in Suzhou Based on EEMs and UV-vis	HE Jie, ZHU Xue-hui, WEI Bin, <i>et al.</i> (1889)
Adsorption and Desorption Behaviors of Antibiotics on TWP and PVC Particles Before and After Aging	FAN Xiu-lei, ZOU Ye-feng, LIU Jia-qiang, <i>et al.</i> (1901)
Synthesis of Magnetic Iron Modifying Biochar for Ammonia Nitrogen Removal from Water	WANG Fang-jun, SANG Qian-qian, DENG Ying, <i>et al.</i> (1913)
Seasonal Effects of Influent Ammonia Oxidizing Bacteria of Municipal Wastewater Treatment Plants on Activated Sludge System	YU Li-fang, WANG Yu, HUA Si-si, <i>et al.</i> (1923)
Analysis of Performance and Microbial Diversity of ANAMMOX Sludge Based on Particle Size Differentiation	WANG Xiao-tong, YANG Hong (1930)
Effects of Chlorine Dioxide Disinfection on the Profile of the Super Antibiotic Resistance Genes in a Wastewater Treatment Plant	CHENG Chun-yan, LI Hai-bei, LIANG Yong-bing, <i>et al.</i> (1939)
Effects of PES and 2,4-DCP on the Extracellular Polymeric Substances and Microbial Community of Anaerobic Granular Sludge	LIN Xu-meng, SU Cheng-yuan, WU Shu-min, <i>et al.</i> (1946)
Characteristics of Sludge and Associated Risk Assessment of Urban Sewage Treatment Plants	LI Juan, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan (1956)
Effects of Climate Warming on the Key Process and Index of Black Soil Carbon and Nitrogen Cycle During Freezing Period	WANG Zi-long, LIU Chuan-xing, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i> (1967)
Effects of Combined Application of Biogas Slurry and Straw on the Migration and Fractions of Soil Heavy Metals in Rice-wheat Rotation System in Coastal Reclamation Areas	WANG Wei, ZHOU Jun-nan, TANG Yi-fan, <i>et al.</i> (1979)
Geochemical Survey Method of Land Quality in Land Parcel Scale City: A Case Study of the Initial Area of the Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, GUO Zhi-juan, LIU Fei, <i>et al.</i> (1989)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, YANG Zhi-bin, WANG Qiao-lin, <i>et al.</i> (2003)
Cadmium Accumulation Characteristics and Impacting Factors of Different Rice Varieties Under Paddy Soils with High Geological Backgrounds	DAI Zi-wen, FANG Cheng, SUN Bin, <i>et al.</i> (2016)
Effects of Different Exogenous Selenium Species Application on Growth and Cadmium Uptake of Pak Choi in Cadmium Contaminated Soil	LIU Yang, QI Ming-xing, WANG Min, <i>et al.</i> (2024)
Influencing Factors of Cadmium Bioaccumulation Factor in Crops	CHEN Jie, WANG Juan, WANG Yi-wen, <i>et al.</i> (2031)
Effects of Different Exogenous Plant Hormones on the Antioxidant System and Cd Absorption and Accumulation of Rice Seedlings Under Cd Stress	ZHANG Sheng-nan, HUANG Yi-zong, LI Yan, <i>et al.</i> (2040)
Effects of Different Organic Materials on Absorption and Translocation of Arsenic and Cadmium in Rice	LI Kai-ye, ZHAO Ting-ting, CHEN Jia, <i>et al.</i> (2047)
Soil Fungal Community Structure and Functional Diversity in a Copper Tailing Dam and Its Surrounding Areas	CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (2056)
Potential of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Biochar, and Combined Amendment on Sandy Soil Improvement Driven by Microbial Community	ZHANG Zhe-chao, YANG Jiu-yang, HAO Bai-hui, <i>et al.</i> (2066)
Animal Manure Fertilization Promotes Antibiotic Resistance Gene Dissemination Among Manure, Soil, and Vegetables	ZHANG Hong-na, DONG Meng-jie, ZHOU Yu-fa, <i>et al.</i> (2080)
Establishment and Application of Performance Evaluation and Obstacle Diagnosis Model for Regional Water Ecological Civilization Construction	WAN Bing-tong, BAO Xue-ying, ZHAO Jian-chang, <i>et al.</i> (2089)