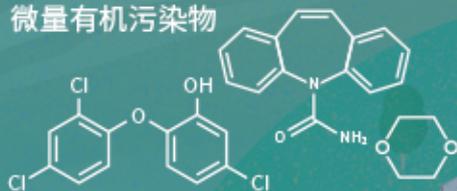


城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路  
王文龙, 吴乾元, 杜焯, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪营

微量有机污染物



## 深度处理

- 污染物非靶向筛查
- 新型处理技术开发
- 处理效率替代性指标
- 工艺运行指南与排放标准

污水处理厂

深度处理

污水再生利用

湖泊湿地等

景观娱乐用水

污水达标排放

下游城市水源地

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心  
■ 出版 科学出版社



2021年6月

第42卷 第6期  
Vol.42 No.6

目次

综述与专论

- 城市环境生物安全研究的进展与挑战 ..... 苏建强, 安新丽, 胡安谊, 朱永官 (2565)  
 城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路 ..... 王文龙, 吴乾元, 杜焯, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪莹 (2573)  
 污泥 EPS 作为阻燃剂的机制归纳与潜力分析 ..... 郝晓地, 赵梓丞, 李季, 时琛, 吴远远 (2583)

研究报告

- 北京大气 PM<sub>2.5</sub> 载体金属浓度、来源及健康风险的城郊差异 ..... 周安琪, 刘建伟, 周旭, 毕思琪, 张博哈, 高越, 曹红斌 (2595)  
 京津冀及周边 MAIAC AOD 和 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度特征及相关性分析 ..... 金国因, 杨兴川, 晏星, 赵文吉 (2604)  
 天津市 PM<sub>2.5</sub> 中二次硝酸盐形成及防控 ..... 肖致美, 武婷, 卫昱婷, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 陈魁, 邓小文 (2616)  
 南京市大气细颗粒物 (PM<sub>2.5</sub>) 中硝基多环芳烃污染特征与风险评估 ..... 傅银银, 文浩哲, 王向华, 于南洋, 李冰, 韦斯 (2626)  
 汾渭平原吸收性气溶胶时空演化及潜在源区分析 ..... 刘旻霞, 李亮, 于瑞新, 宋佳颖, 张国娟, 穆若兰, 徐璐 (2634)  
 西南典型区域夏季大气含氧挥发性有机化合物来源解析 .....  
 ..... 陈木兰, 王赛男, 陈天舒, 朱波, 彭超, 周佳维, 车汉雄, 黄汝辉, 杨复沫, 刘合凡, 谭钦文, 韩丽, 陈军辉, 陆克定, 陈阳 (2648)  
 气溶胶中溶解性有机质 (DOM) 液相氧化 ..... 陶冶, 陈彦彤, 李楠旺, 张敬宇, 叶招莲, 盖鑫磊 (2659)  
 基于 MERRA-2 再分析资料的上海市近 40 年大气黑碳浓度变化及潜在来源解析 .....  
 ..... 曹闪闪, 段玉森, 高婵婵, 苏玲, 杨怡萱, 张洋, 蔡超琳, 刘敏 (2668)  
 石家庄市臭氧和二氧化氮的时空演替特征及来源解析 ..... 王帅, 聂赛赛, 冯亚平, 崔建升, 陈静, 刘大喜, 石文雅 (2679)  
 基于光化学指数的邯郸市臭氧生成敏感性 ..... 牛元, 程水源, 欧盛菊, 姚诗音, 沈泽亚, 关攀博 (2691)  
 基于 Landsat 数据的关中盆地腹地 AOD 时空格局及城市化对其影响 ..... 郑玉蓉, 王旭红, 张秀, 胡贵贵, 梁秀娟, 牛林芝, 韩海青 (2699)  
 基于卫星遥感和地面观测的人为源 VOCs 区域清单多维校验 ..... 王玥, 魏巍, 任云婷, 王晓琦, 陈赛赛, 程水源 (2713)  
 中原城市群国家干线公路 SOA 生成潜势估算 ..... 王娜萍, 李海萍, 张帆 (2721)  
 北京市“大气十条”实施的空气质量改善效益 ..... 卢亚灵, 范朝阳, 蒋洪强, 牛传真, 李勃 (2730)  
 工业大气污染源排放绩效定量评价及应用 ..... 李廷昆, 冯银厂, 吴建会, 毕晓辉, 张裕芬 (2740)  
 基于生态风险的我国水环境高风险抗生素筛选排序 ..... 周力, 刘珊, 郭家骅, 李琦 (2748)  
 基于 RDA-REM 模型的我国再生水开发利用潜力 ..... 郑锦涛, 马涛, 刘九夫, 彭安帮, 邓晰元, 郑皓 (2758)  
 基于模型研究质量评价的 SWAT 模型参数取值特征分析 ..... 荣易, 秦成新, 杜鹏飞, 孙博 (2769)  
 大型浅水湖泊水质模型边界负荷敏感性分析 ..... 王亚宁, 李一平, 程月, 唐春燕, 陈刚 (2778)  
 不同流域水陆过渡带磷有效态的特征对比及环境意义 ..... 朱海, 袁旭音, 叶宏萌, 成瑾, 毛志强, 韩年, 周慧华 (2787)  
 基于不同赋权方法的北运河上游潜在非点源污染风险时空变化特征分析 .....  
 ..... 李华林, 张建军, 张耀方, 常国梁, 时迪迪, 徐文静, 宋卓远, 于佩丹, 张守红 (2796)  
 长期施肥和耕作下紫色土坡耕地径流 TN 和 TP 流失特征 ..... 吴小雨, 李天阳, 何丙辉 (2810)  
 渭河和泾河流域浅层地下水水化学特征和控制因素 ..... 刘鑫, 向伟, 司炳成 (2817)  
 太湖流域上游南苕溪水夏季水体溶存二氧化碳和甲烷浓度特征及影响因素 .....  
 ..... 梁佳辉, 田琳琳, 周钟昱, 张海阔, 张方方, 何圣嘉, 蔡廷江 (2826)  
 低温期浅水湖泊氮的分布及无机氮扩散通量: 以白洋淀为例 ..... 文艳, 单保庆, 张文强 (2839)  
 覆盖条件下底泥微环境对内源磷释放的影响 ..... 陈姝彤, 李大鹏, 徐楚天, 张帅, 丁玉琴, 孙培荣, 黄勇 (2848)  
 圩区河道底泥腐殖酸对重金属和抗生素的共吸附 ..... 薛向东, 杨宸豪, 于荐麟, 庄海峰, 方程冉 (2856)  
 两种 PPCPs 对雅鲁藏布江沉积物硝化作用的影响 ..... 凌欣, 徐慧平, 陆光华 (2868)  
 铁碳微电解及沸石组合人工湿地的废水处理效果 ..... 赵仲婧, 郝庆菊, 张尧钰, 熊维霞, 曾唯, 陈俊江, 江长胜 (2875)  
 CDs-BOC 复合催化剂可见光下活化过硫酸盐降解典型 PPCPs ..... 雷倩, 许路, 艾伟, 李志敏, 杨磊 (2885)  
 pg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOBr/Ag 复合材料的制备及其光催化降解磺胺甲噁唑 ..... 杨利伟, 刘丽君, 夏训峰, 朱建超, 高生旺, 王洪良, 王书平 (2896)  
 海藻酸钠负载硫化零价铁对水体中 Cr(VI) 的还原去除 ..... 王旭, 杨欣楠, 黄币娟, 刘壮, 牟诗萌, 程敏, 谢燕华 (2908)  
 超顺磁性纳米 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@SiO<sub>2</sub> 功能化材料对镉的吸附机制 ..... 张立志, 易平, 方丹丹, 王强 (2917)  
 典型药物在医院废水和城市污水处理厂中的污染特征及去除情况 ..... 叶璞, 游文丹, 杨滨, 陈阳, 汪立高, 赵建亮, 应光国 (2928)  
 印染废水循环利用抗生素抗性基因丰度变化特性 ..... 徐瑶瑶, 王锐, 金鑫, 石炬, 王岩, 金鹏康 (2937)  
 短程硝化反硝化除磷颗粒污泥的同步驯化 ..... 王文琪, 李冬, 高鑫, 刘博, 张杰 (2946)  
 厌氧氨氧化颗粒污泥的长期保藏及快速活性恢复 ..... 李冬, 刘名扬, 张杰, 曾辉平 (2957)  
 市政污泥热解过程中重金属迁移特性及环境效应评估 ..... 姜媛媛, 王彦, 段文焱, 左宁, 陈芳媛 (2966)  
 不同作物农田土壤抗生素抗性基因多样性 ..... 黄福义, 周曙仝, 王佳妮, 苏建强, 李虎 (2975)  
 宁夏养牛场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征 ..... 张俊华, 陈睿华, 刘吉利, 尚天浩, 沈聪 (2981)  
 温度和搅拌对牛粪厌氧消化系统抗生素抗性基因变化和微生物群落的影响 .....  
 ..... 许继飞, 张秋萍, 朱天骄, 秦帅, 朱文博, 庞小可, 赵吉 (2992)  
 小麦秸秆生物质炭施用对不同耕作措施土壤碳含量变化的影响 ..... 刘振杰, 李鹏飞, 黄世威, 金相乐, 张阿凤 (3000)  
 农牧交错带典型区土壤氮磷空间分布特征及其影响因素 ..... 张燕江, 王俊鹏, 王瑜, 张兴昌, 甄庆, 李鹏飞 (3010)  
 汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价 ..... 王锐, 邓海, 贾中民, 王佳彬, 余飞, 曾琴琴 (3018)  
 调理剂对磷镉富集土壤中两种元素交互作用的影响 ..... 黄洋, 胡学玉, 曹坤坤, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (3028)  
 S-烯丙基-L-半胱氨酸缓解水稻种子幼根和幼芽镉胁迫机制 ..... 程六龙, 黄永春, 王常荣, 刘仲齐, 黄益宗, 张长波, 王晓丽 (3037)  
 连续 4 个生长季大气 CO<sub>2</sub> 升高与土壤铅 (Pb) 污染耦合下刺槐幼苗根际土壤微生物特征 .....  
 ..... 贾夏, Lkhagvajargal Khadkhurel, 赵永华, 张春燕, 张宁静, 高云峰, 王子威 (3046)  
 嗜热脂肪地芽孢杆菌对聚苯乙烯的降解性能 ..... 邢睿智, 赵子强, 赵文琪, 陈志, 陈金凤, 周顺桂 (3056)  
 冬青和女贞叶表面颗粒物微形态及叶际细菌群落结构 ..... 李慧娟, 徐爱玲, 乔凤祿, 蒋敏, 宋琪 (3063)  
 罗红霉素对大型溛生殖生长及抗氧化系统的影响 ..... 张凌玉, 刘建超, 冷阳, 陆光华 (3074)  
 中国粮食作物产量和木本植物生物量与地表臭氧污染响应关系 ..... 冯兆忠, 彭金龙 (3084)  
 《环境科学》征订启事 (2698) 《环境科学》征稿简则 (2712) 信息 (3027, 3055, 3073)

# 印染废水循环利用抗生素抗性基因丰度变化特性

徐瑶瑶, 王锐, 金鑫, 石焯, 王岩, 金鹏康\*

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

**摘要:** 城市污水处理系统中抗生素抗性基因( ARGs) 分布研究较多, 但是工业废水循环利用时 ARGs 丰度变化特性研究尚存不足. 为此, 本研究构建了印染废水循环利用系统, 采用 16S rDNA 技术分析印染废水循环利用过程中微生物群落的变化特性, 采用高通量测序技术表征 ARGs 丰度变化趋势. 循环初期, 活性污泥中共检出 9 大类 52 种 ARGs, 其中  $\beta$ -内酰胺类( $\beta$ -lactam) 抗性基因的相对丰度最高. 循环过程中, 芳烃类污染物浓度随循环次数的增加而升高,  $\beta$ -内酰胺类抗性基因丰度则先升高后降低再升高(第 100 d, 上升 61.85%). 与此同时, 与 ARGs 相关的 Firmicutes、Actinobacteria 和 Cyanobacteria 的丰度显著下降(降幅分别为 84.66%、64.38% 和 85.15%). 超过 21 种 ARGs 受到芳烃类污染物富集的显著影响, 其中, 6 种 ARGs 与芳烃类污染物的浓度变化极显著正相关, 6 种极显著负相关. 这些结果表明, ARGs 的丰度变化受微生物群落和芳烃类污染物的影响, 在印染废水循环利用过程中呈现先上升后下降再上升的变化趋势. 本研究揭示了印染废水循环利用过程中芳烃类污染物的富集与微生物群落的变化对 ARGs 的影响, 对印染工业废水循环利用降低抗生素抗性基因对环境的污染提供了理论指导.

**关键词:** 抗生素抗性基因( ARGs); 印染废水( PDWW); 细菌群落; 循环利用; 芳香族化合物

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)06-2937-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202007226

## Abundance Change of Antibiotic Resistance Genes During PDWW Recycling and Correlations with Environmental Factors

XU Yao-yao, WANG Rui, JIN Xin, SHI Xuan, WANG Yan, JIN Peng-kang\*

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Research on the distribution of antibiotic resistance genes (ARGs) in urban sewage treatment systems is extensive, but there is still insufficient research on their abundance in industrial wastewater recycling systems. In this study, a printing and dyeing wastewater (PDWW) recycling system was constructed, and 16S rDNA and high-throughput sequencing technology was used to analyze the microbial communities and ARG abundance during the treatment process. A total of 52 ARGs in nine categories were detected, of which the relative abundance of  $\beta$ -lactam resistance genes was the highest. During the treatment cycle, the concentration of aromatic pollutants increased with an increase in the number of cycles, while the abundance of  $\beta$ -lactam resistance genes increased first, decreased, and then increased (reaching 61.85% on the 100th day). At the same time, the abundance of Firmicutes, Actinobacteria, and Cyanobacteria related ARGs decreased significantly (by 84.66%, 64.38%, and 85.15%, respectively). More than 21 kinds of ARGs were significantly affected by the enrichment by the aromatic pollutants. Among them, 6 kinds of ARGs were significantly positively correlated with changes in the concentrations of the aromatic pollutants ( $P < 0.01$ ), while 6 were significantly negatively correlate ( $P < 0.01$ ). These results show that the abundance of ARGs was affected by the microbial communities and the aromatic pollutants, which increased at first, decreased, and then increased during the PPDW recycling process. This study reveals the effects of the enrichment of aromatic contaminants and changes in microbial communities on ARGs during PPDW recycling, and provides theoretical guidance for the recycling of PDWW to reduce environmental pollution associated with ARGs.

**Key words:** antibiotic resistance genes( ARGs); printing and dyeing wastewater( PDWW); bacterial community; recycling; aromatic compounds

纺织印染废水占每年产生废水的很大比例<sup>[1]</sup>, 由于水资源缺乏, 再生水回用一直是研究的热点问题<sup>[2,3]</sup>. 尽管印染工业废水的可生化性低, 属于难处理废水, 但是采用二段物化和生化组合工艺, 处理后废水能达到排放标准限值要求<sup>[4,5]</sup>. 印染工业用水更多是就地循环、多次回用于生产<sup>[6]</sup>.

在过去的几十年中, 过度使用抗菌药物加速了微生物耐药性的出现<sup>[7]</sup>. 作为公共卫生问题, 近年来抗生素抗性基因( antibiotic resistance genes, ARGs) 污染问题已引起越来越多的关注<sup>[8,9]</sup>. 污水处理厂是 ARGs 的主要聚集区<sup>[10]</sup>, 研究影响生物反应器 ARGs 发生的因素对制定适当的缓解策略非常重要. 已有研

究证实印染废水( printing and dyeing wastewater, PDWW) 中 ARGs 的数均高于生活污水<sup>[11]</sup>, 印染废水也是 ARGs 重要的人为来源之一. 此外, 低剂量抗生素不能杀死细菌, 反而能够促进基因水平转移<sup>[12-15]</sup>, 而印染废水生物反应器中存在的多种芳香族化合物会促进 ARGs 的转移. 因此, 印染废水活性污泥被认

收稿日期: 2020-07-24; 修订日期: 2020-11-26

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目( 51708443); 国家重点研发计划项目( 2016YFC0400701); 陕西省教育厅重点项目( 18JS057); 陕西高校新型智库项目

作者简介: 徐瑶瑶( 1996 ~ ), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水与废水处理, E-mail: 18291945029@163.com

\* 通信作者, E-mail: pkjin@hotmail.com

为是抗生素耐药基因(ARGs)的贮存库之一<sup>[16~18]</sup>, 印染废水中的 ARGs 成为研究的热点. 但是, 印染废水循环利用过程中芳香族化合物的富集与微生物群落的变化对 ARGs 的影响尚不清晰.

本研究构建了印染废水循环利用系统, 采用高通量测序定量基因, 探讨 3 个问题: ① 抗生素抗性基因在循环利用过程中的变化趋势; ② 循环过程中微生物群落变化及其与抗生素抗性基因的相关性和 ③ 循环过程中芳烃污染物的富集及其与抗生素抗性基因的相关性. 本研究对了解印染废水循环利用中 ARGs 丰度的变化及其影响因素具有指导意义.

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 实验装置与运行条件

印染废水循环利用系统包括原水池、混凝沉淀池、水解酸化池、好氧生物池、二沉池和臭氧气浮池(图 1). 其中水解酸化池和好氧生物池设计处理能力均为  $5 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ , 24 h 连续运行, 水力停留时间(HRT)分别为 9 h 和 16 h. 水解污泥和活性污泥取自浙东沿海某印染产业集聚区污水处理厂. 好氧池初始污泥浓度控制在  $3000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  左右, 污泥龄控制为 12 d. 臭氧气浮池处理能力  $36$

$\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ , PAC 投加量为  $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 接触区混合时间 60 s, 溶气比为 1:10, 分离区水力停留时间为 60 min, 溶气压 0.4 MPa, 回流比为 40%. 模拟印染废水由混合染料、助剂和营养盐组成. 助剂均来自工业化产品, 与实际印染废水组成接近一致. 模拟印染废水 COD:N:P 为 200:5:1, 有助于生物处理系统正常运行.

运行分为驯化期和循环利用期. 生物系统接种活性污泥后, 进入 20 d 驯化期, 在此阶段梯度递增印染废水中染料和助剂量, 处理出水外排. 最终接种微生物已能很好适应人工模拟印染废水中的有机物和无机物, 处理出水 COD 为  $60 \sim 80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 色度为 2~4 倍; 进入循环利用实验阶段, 出水返至原水箱, 在原水箱中投加定量染料和助剂配制模拟印染废水后, 再次进入物化和生化处理系统. 初沉污泥、剩余污泥和气浮渣排放量约为  $0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ , 由此产生近 10% 的污水散失率, 每次配水时用工业给水将原水补足到  $5 \text{ m}^3$ . 系统总回用比例大于 90%, 运行特征为闭路循环. 系统循环终止运行的评判标志为好氧池活性污泥浓度降至  $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以下或 SOUR 值低于  $1 \text{ g} \cdot (\text{mg} \cdot \text{L})^{-1}$ , 低于此值活性污泥系统净化功能处于低效水平<sup>[19]</sup>.

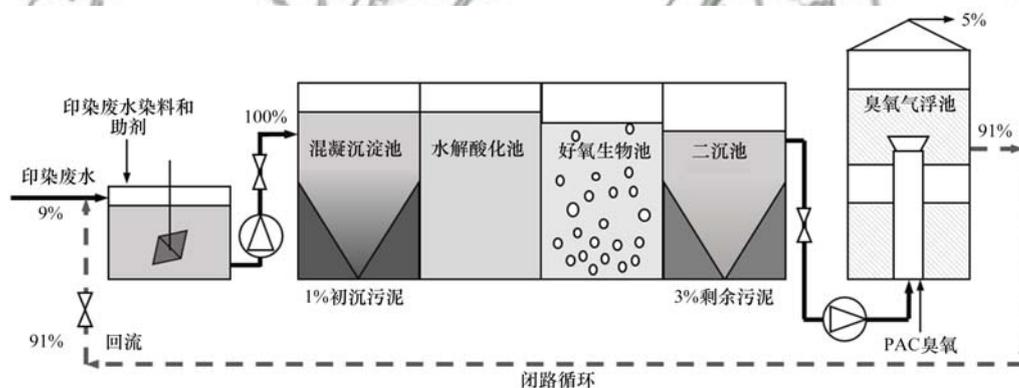


图 1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

### 1.2 样品采集与预处理

在原水箱、水解酸化池和好氧生物池出口等 5 个地方布设水样采集点, 以分析不同循环时间下, 有机物沿处理流程变化规律; 生物相采用水解污泥和好氧污泥作为研究对象, 污泥采集点位为水解酸化污泥和好氧池污泥. 泥样采集间隔时间均为 20 d, 采集至第 100 d. 污泥样品采集后离心脱水, 弃去上清液, 固相于  $-20^\circ\text{C}$  低温保存, 保存时间低于 60 d. AS00、AS20、HS00 和 HS20 分别代表好氧池运行第 1 d、好氧池运行第 20 d、水解酸化池运行第 1 d 和水解酸化池运行第 20 d 的样品.  $\text{UV}_{254}$  的测定采用紫外/可见分光光度计进行测定(UV-2102C, UNIC, 中

国), 波长为 254 nm, 比色皿采用 1 cm 石英比色皿, 苯胺的测定采用高效液相色谱仪(日本岛津公司)和带 ESI 源 API 4000 QTrap 三重四极杆质谱仪(美国 AB SCIEX 公司)测定<sup>[20]</sup>, 采用分散液相微萃取结合气相色谱法分析水中苯系物<sup>[21]</sup>.

### 1.3 DNA 提取与测定

污泥细菌总 DNA 提取、PCR 操作和 16S rDNA 测序由北京诺禾致源公司完成. 首先, 采用 Power Soil DNA 提取试剂盒(MO Biomedical, U. S.)对生物膜样本中的 DNA 进行提取. 然后, 选取细菌基因的 V3~V4 区进行聚合酶链式反应(PCR)扩增, 选取引物为 338F(5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCA-3')

和 806R(5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3'). 在使用 AxyPrepDNA 凝胶回收试剂盒 (AXYGEN 公司) 切胶回收 PCR 产物后, 用 QuantiFluor™-ST 蓝色荧光定量系统 (Promega 公司) 进行检测定量, 然后按照 Illumina MiSeq 平台的测序要求进行测序. 本研究高通量测序数据的序列保存在 NCBI 序列读取档案中, 登记号为 SRR12451724.

#### 1.4 ARGs 丰度测定

ARGs 丰度测定方法为, 首先使用 CARD 数据库提供的 Resistance Gene Identifier (RGI) 软件将 Unigenes 与 CARD 数据库 (<https://card.mcmaster.ca/>) 进行比对 (RGI 内置 blastp, 默认  $evalue \leq 10^{-30}$ )<sup>[22-24]</sup>. 根据 RGI 的比对结果, 结合 Unigenes 的丰度信息, 统计出各 ARGs 的相对丰度. 最后, 从 ARGs 的丰度出发, 进行丰度柱形图和聚类热图分析.

#### 1.5 微生物群落分析

使用 Qime(version1.17) 软件进行数据去杂, 使用 Uparse (version7.1) 方法将操作分类单位 (operational taxonomic units, OTUs) 进行分类, OTU 中序列相似性设为 97%, 得到 OTU 的代表序列<sup>[25]</sup>; PCR 扩增中产生的嵌合体序列使用 Uchime (version4.2.40) 检测, 并从 OTU 中去除; 使用 Usearch\_global 方法将优化序列 map 比对回 OTU 代表序列, 得到 OTU 个样品序列丰度统计表. 采用 Mothur(version1.30.1) 软件分析群落多样性指数 (Shannon 指数)、丰富度指数 (Chao 指数; ACE 指数) 和覆盖率指数 (Good's coverage) 来反映微生物群落的多样性 ( $\alpha$  diversity). 采用 RDP classifier 贝叶斯算法, 对 97% 相似水平的 OTU 代表序列进行分类学分析, 从而得到每个 OTU 所对应的物种分类信息, 并统计每个样品的群落组成. 使用 R 语言 Veran 包进行热图 (Heatmap) 分析, 并采用 Vegdist 和 Hclust 进行距离计算和聚类分析, 距离算法为 Bray-Curtis, 聚类方法为 Complete.

#### 1.6 统计分析

采用 Microsoft Excel2010 对数据进行处理, 并用 Origin9.0 进行图解和相关分析. 在 R3.3.2 (<http://cran.r-project.org>) 中利用 Pheatmap package 构建基于各富集样品优势细菌属的热图; 用 Canoco4.5 进行了 ARGs 与细菌群落的相关性的冗余分析 (RDA). 用 Spearman 相关分析探讨了 ARGs 与细菌群落和芳香族化合物的相关性.

## 2 结果与讨论

### 2.1 印染废水循环利用系统运行情况

印染废水二级出水中含有部分染料降解中间产

物, 这些有机物是二级处理水中溶解性 COD 的重要来源<sup>[26]</sup>. 很多染料降解中间产物都具有苯环结构, 其中代表性的污染物为苯胺类 (Aniline)、单环芳烃类 (MAHs) 和多环芳烃类 (PAHs) 等<sup>[27]</sup>. 印染废水循环利用条件下, 二级处理水中 UV<sub>254</sub>、单环芳烃类、多环芳烃类和苯胺污染物浓度变化曲线如图 2 所示. UV<sub>254</sub> 反映水中含 C=C 键和 C=O 键的芳香族化合物含量. 在循环利用初始阶段, 进水和水解出水中 UV<sub>254</sub> 快速增长, 到第 30 d 增速减缓 [图 2(a)]. 而二级出水中的 UV<sub>254</sub> 出现波动, 经历了增长、下降再增长的过程. 从 UV<sub>254</sub> 变化曲线可以看出, 污染物富集对微生物系统的冲击拐点出现在第 60 d [图 2(a)]. 图 2(b) 显示, 原水中苯胺浓度为 9.80 ~ 10.10 mg·L<sup>-1</sup>. 二级出水中苯胺初始浓度为 1.83 mg·L<sup>-1</sup>, 前 70 d 保持稳定. 从第 70 d 开始, 二级出水中苯胺浓度出现显著增加, 到第 100 d 达到 3.92 mg·L<sup>-1</sup>, 富集了 1.14 倍. 图 2(c) 显示了芳香烃的浓度. 在循环利用过程中, 通过预处理和生物处理, MAHs 的去除效率均高于 99%. 众所周知, MAHs 具有很高的挥发性, 大部分 MAHs 可在好氧池曝气过程有效去除. 虽然二级出水中的 MAHs 残留量很低, 但也存在 MAHs 积累现象. 苯系物从初期 0.87 μg·L<sup>-1</sup> 升高到运行末期的 1.30 μg·L<sup>-1</sup>, 增长了 1.49 倍. 图 2(d) 显示, 100 d 内二级出水多环芳烃的浓度从 390 ng·L<sup>-1</sup> 增加到 680 ng·L<sup>-1</sup>, 循环初期, 苯系物浓度增速较快, 到末期苯系物浓度增速减缓. PAHs 物质浓度富集过程与苯系物相反, 初期增速较慢, 后期增速较快.

### 2.2 不同循环周期 ARGs 的多样性和丰度

采用高通量方法分析活性污泥中抗性基因丰度, 共检测出 52 个抗生素抗性基因, 其中丰度排名前 35 的基因如图 3 所示. 编码的基因产物可分为 9 种类别的抗生素抗性基因 [图 3(a)]: β-内酰胺类 (β-lactam)、氨基糖苷类 (Aminoglycoside)、氟喹诺酮-喹诺酮-氟苯尼考-氯霉素-胺酰醇类 (FCA)、大环内酯-林肯酰胺酶-链阳性菌素 B 类 (MLSB)、磺胺类 (Sulfonamide)、四环素类 (Tetracycline)、万古霉素类 (Vancomycin)、外排类 (Efflux) 和其他 (other).

对比得到水解污泥和活性污泥中的抗性基因分布情况如表 1 所示. 其中 HS100 是本研究循环至第 100 d 时的水解污泥, AS100 是循环至第 100 d 时的好氧污泥, G-An、G-Ax 和 G-Ox 来自于文献 [28], 分别代表厌氧池泥水混合物、缺氧池泥水混合物和好氧池泥水混合物. 由表 1 可以看出, 不同样品中抗性基因的分布存在相类似性, 即 *ermB* 在各样品中的

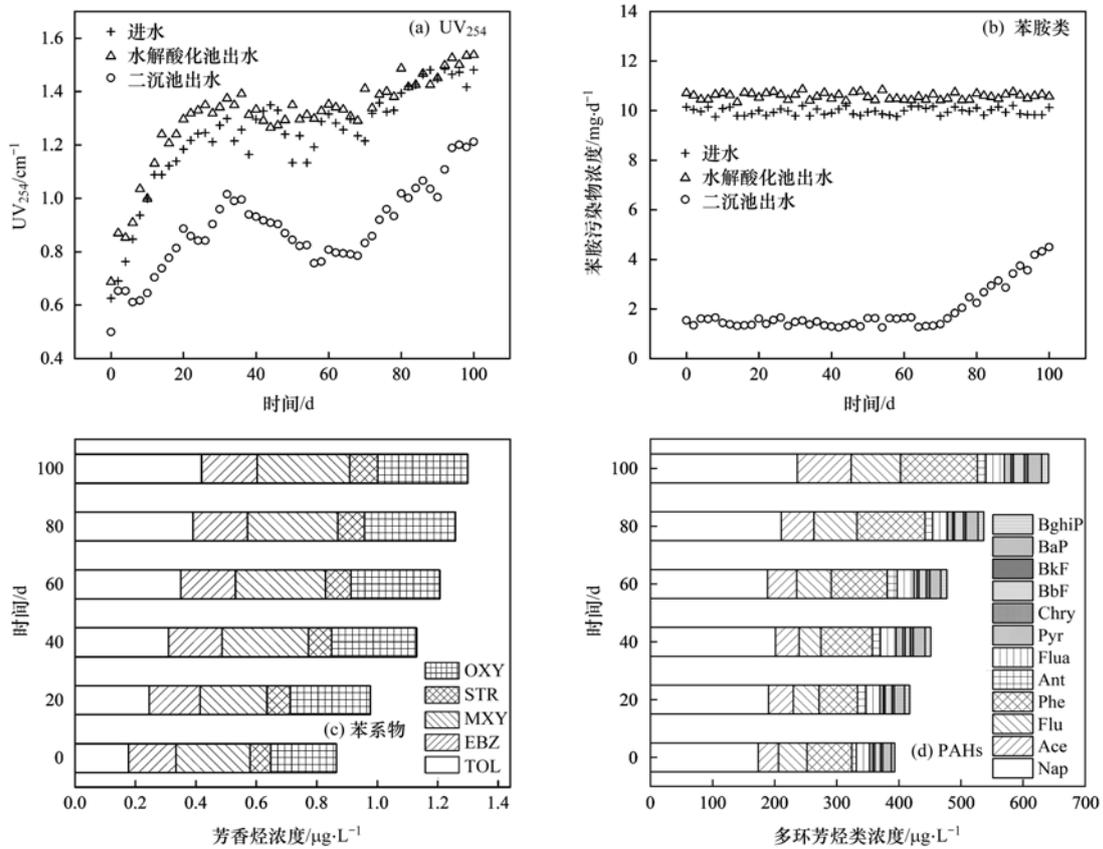


图 2 印染废水循环芳香类污染物浓度变化

Fig. 2 Changes in the concentrations of aromatics pollutants during PPDW recycling

表 1 不同样品中抗生素抗性基因的相对丰度

Table 1 Relative abundance of ARGs in different samples

ARGs	HS100	AS100	G-An <sup>[28]</sup>	G-Ax <sup>[28]</sup>	G-Ox <sup>[28]</sup>
<i>ermB</i>	0.000 133	8.75E -05	0.009 995	0.012 909	0.015 548
<i>tetA</i>	5.34E -06	4.18E -05	0.005 992	0.006 889	0.009 765
<i>sul I</i>	1.57E -05	5.03E -06	1.59E -05	0.000 231	0.007 217
<i>sul II</i>	4.92E -06	1.43E -05	0.000138	0.000 138	0.000 206

相对丰度均最高,且 *tetA* 和 *sul II* 更易集中在好氧池,另外,本研究印染废水循环利用运行至第 100 d 时,抗性基因的相对丰度整体小于文献[28]中的相对丰度.

如图 3 所示,所有样本中 ARGs 的多样性分布均呈相同趋势,即 ARGs 随循环次数的增加而富集,特别是在水解污泥中编码  $\beta$ -内酰胺、其他和外排抗性的基因,HS100 的富集明显高于其他时间.值得注意的是,水解污泥内的 ARGs 相对丰度(第 100 d:  $1.5E - 3$ )总体高于好氧污泥内的 ARGs 相对丰度(第 100 d:  $1.26E - 3$ ),可以解释为好氧处理对抗性基因有一定的去除效果.相较于前一天,富集倍数最大的是 HS100 中的磺胺类抗性基因(2.62 倍).不同的基因其丰度最高时所处的时期不同,数量最多的 K07576 基因,在 AS60 时相对丰度显著增高.其次是 *ampG* 基因和 *marC* 基因,相对丰度最高的时期

均在 AS40. 结合图 4 所示,有 7 种抗性基因(*penP*、*tetA*、*mef*、*aacC*、*aac62*、*ampC*、*ebr*, 占比 13%)显示出类似的趋势,在第 0 ~ 100 d 的循环中,相对丰度呈现先降低后增长的趋势,有 5 种抗性基因(*emrE*、*TCSMR3*、*tetM*、*ereAB*、*mdtH*)分别在 AS20 和 AS80 出现最高丰度和最低丰度.

### 2.3 细菌群落结构

图 5(a) 显示,印染废水循环利用过程中,好氧活性污泥微生物群落组成变化显著.总体来说,运行初始阶段好氧活性污泥中共检测到 19 个已知菌门,主要包括变形菌门(Proteobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidetes)、TM6\_Dependentiae、厚壁菌门(Firmicutes)、Ignavibacteriae 和绿弯菌门(Chloroflexi),丰度分别为 58.95%、18.68%、4.04%、3.38%、2.60% 和 1.99%. 在第 40 d 之后,大部分细菌门急剧减少,如 Bacteroidetes、TM6\_

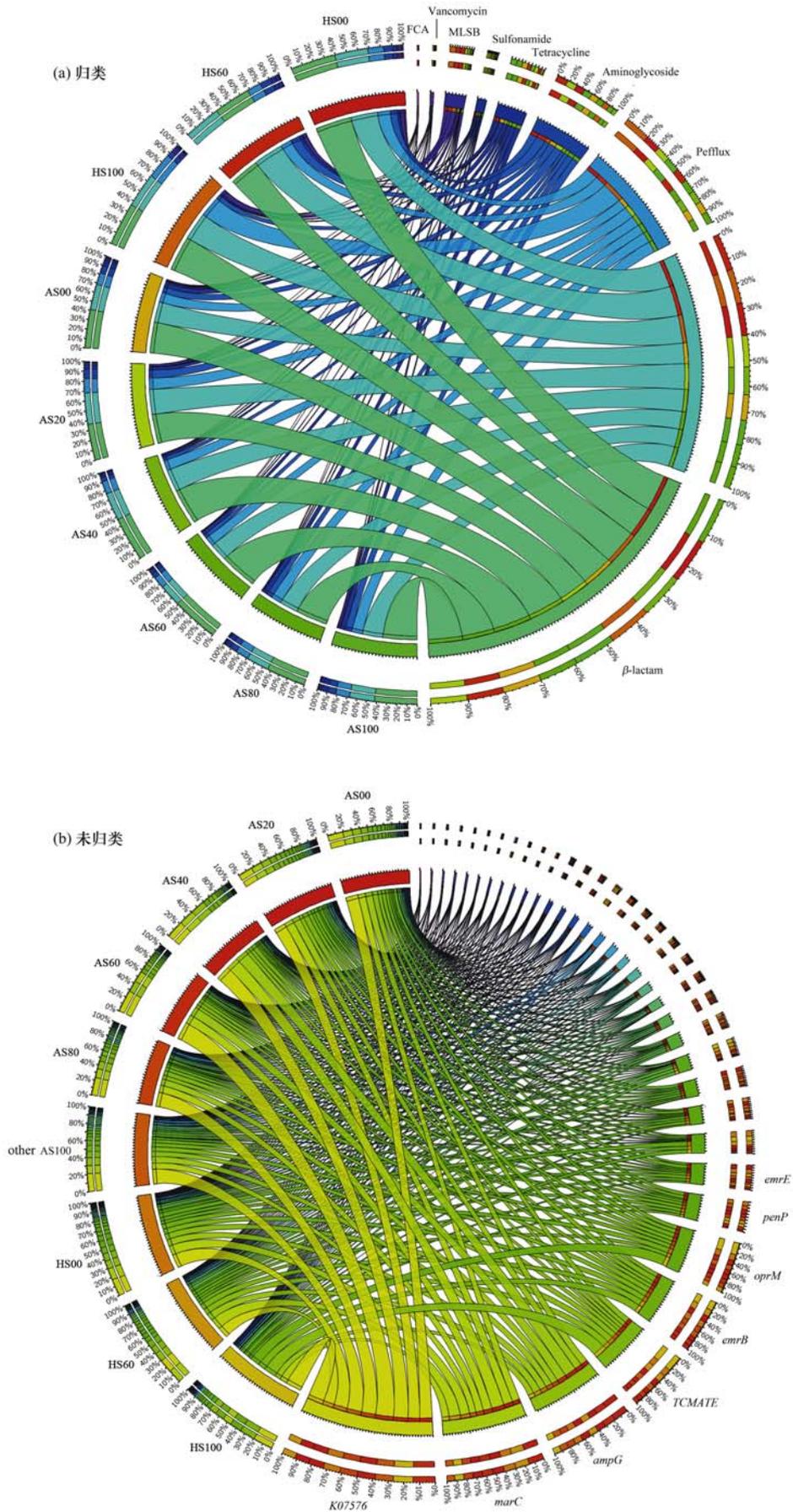
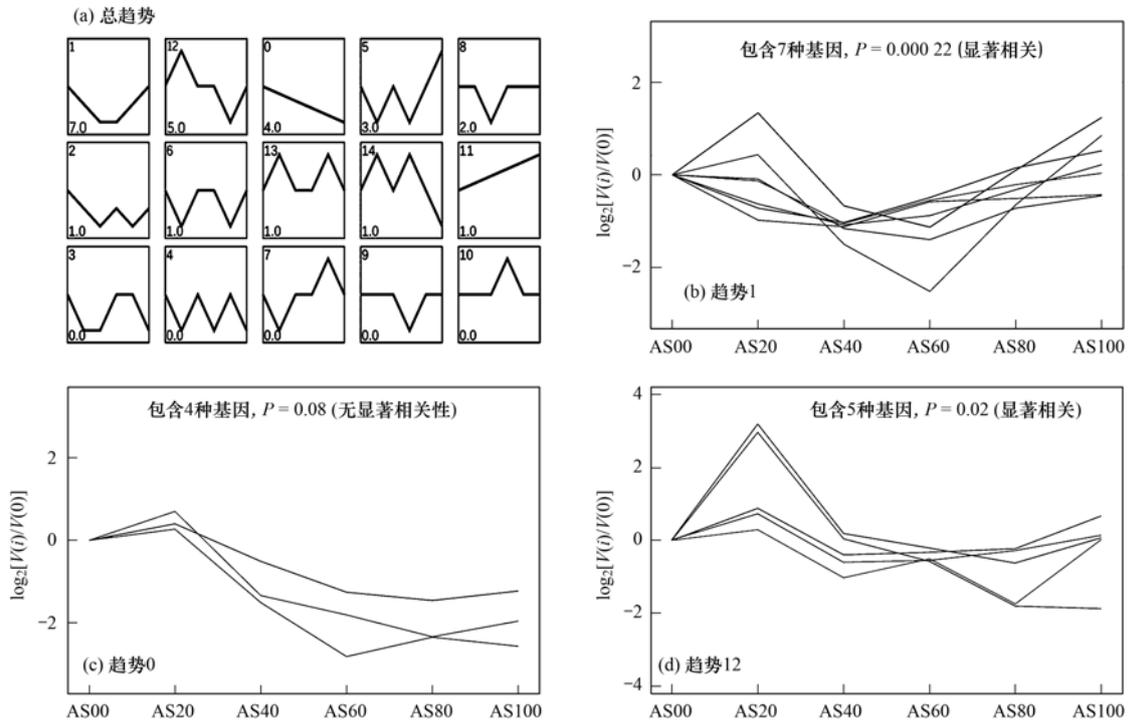


图 3 ARGs 在不同时期中的相对丰度

Fig. 3 Relative abundance of ARGs at different periods



(a) 中每一个方格代表一种趋势, 方格内左上角数字表示趋势的序号, 方格内左下角的数字表示该趋势所含基因的种数

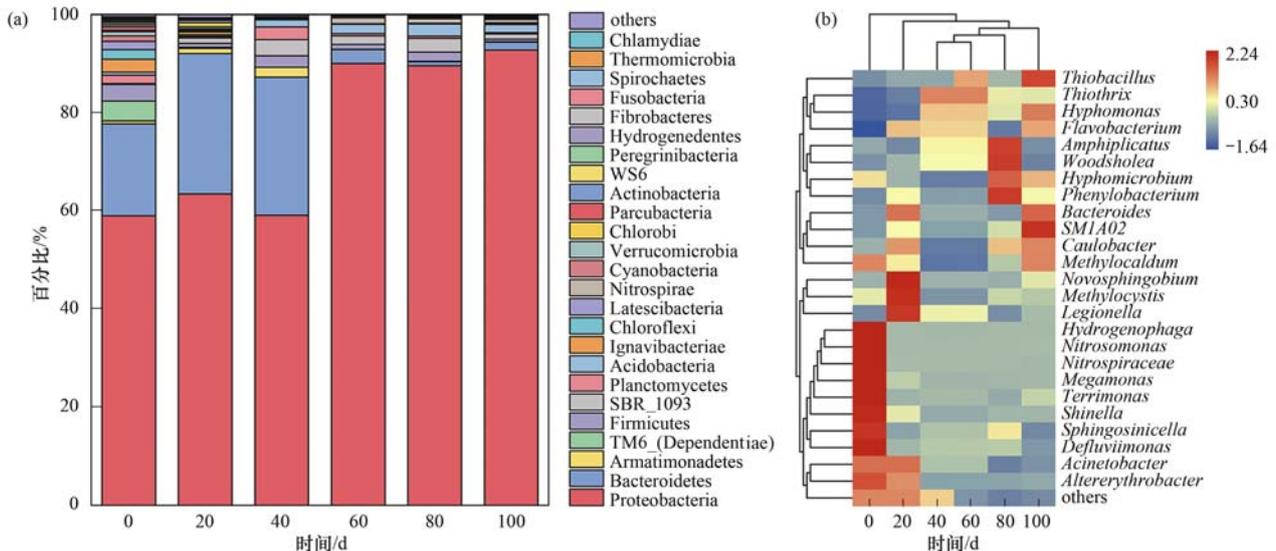
图 4 第 0 ~ 100 d 的 ARGs 丰度变化趋势分析

Fig. 4 Trends in ARGs from 0 to 100 cycles

Dependentiae、Firmicutes、Ignavibacteriae 和 Chloroflexi 等, 甚至有些门最终消失, 如游动杆菌门 (Peregrinibacteria) 和俭菌超门 (Parcubacteria). 值得注意的是, 变形菌的丰度从 58.95% 增加到 92.62%. 此外, 图 5 中的 SBR\_1093 丰度从 0.16% 逐渐增加到 1.06%. 与本文情况相似, 变形菌在高苯胺负荷率时成为优势菌<sup>[29]</sup>, 变形菌门在印染废水、市政污水处理的活性污泥中处于优势门. 本项目研究中, 变形菌在循环时间的不断增加下, 丰度逐

渐上升到 90.02%, 但是, 其它微生物门类丰度大幅降低甚至消失.

根据所有样品在属水平的物种注释及丰度信息, 选取丰度排名前 35 的属, 根据其在每个样品中的丰度信息, 绘制成热图, 便于发现哪些物种在哪些样品中聚集较多或含量较低. 细菌群落在属水平上的变化结果如图 5(b) 所示, 没有一种微生物丰度处于持续稳定状态. 印染废水循环利用过程中硫杆菌属 (*Thiobacillus*) 的相对丰度由 9.52% 上升到



(a) 门水平; (b) 属水平

图 5 印染废水循环利用活性污泥群落组成

Fig. 5 Bacterial community composition in activated sludge during PPDW recycling

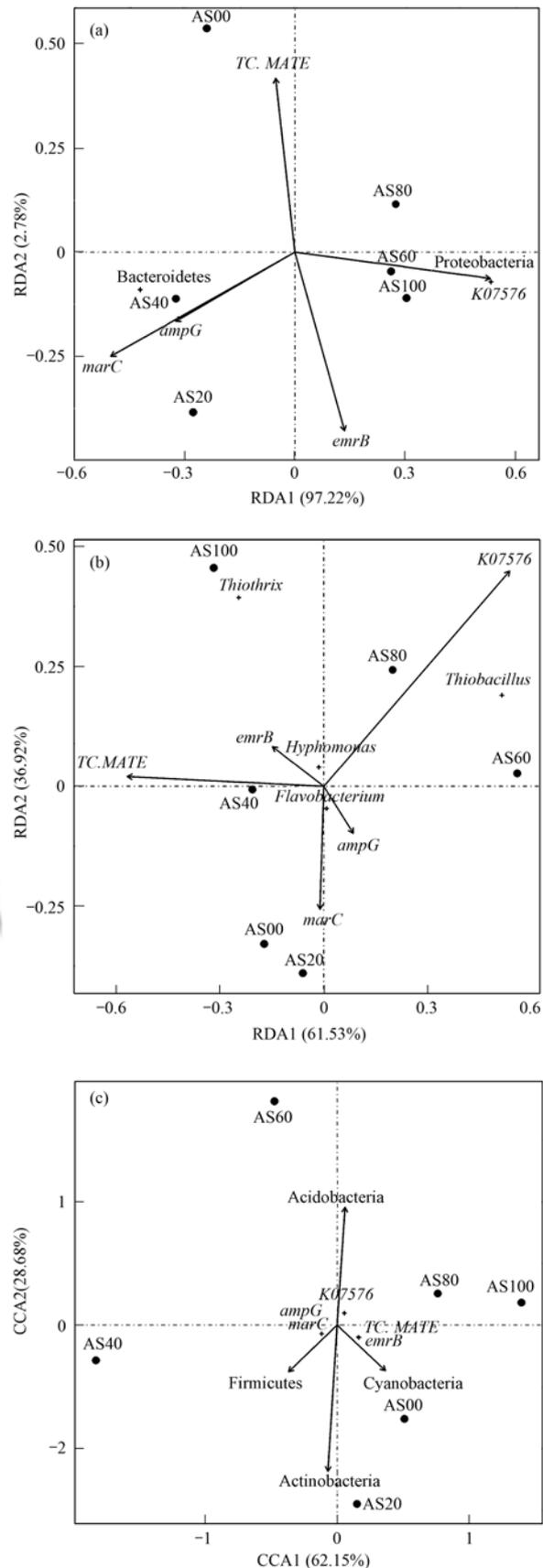
53.81%, 然后下降到 17.10%。此外, 丝硫菌属 (*Thiothrix*) 的丰度从 14.22% 下降到 10.32%, 然后上升到 48.72%。因此, 丝硫菌属成为优势属[图 5 (b)]。总体而言, 好氧条件下聚类微生物种数随循环次数增多持续下降。

## 2.4 ARGs 与细菌群落的关系

RDA 分析能反映菌群与 ARGs 之间的关系。好氧污泥中 ARGs 与微生物群落之间的 RDA 分析结果见图 6, 其中显示 *K07576* 和 *TCMATE* 这两种抗性基因与微生物群落分布相关关系显著。在属水平上, 硫杆菌 (*Thiobacillus*) 与 *K07576* 呈正相关, 在门水平上, 变形菌门 (Proteobacteria) 与 *K07576* 呈正相关, 而硫杆菌和变形菌在循环利用过程中逐渐得到富集, 属于优势菌种, 因此可以解释 *K07576* 是丰度最高的抗性基因。拟杆菌门 (Bacteroidetes) 与 *marC* 和 *ampG* 呈正相关, 拟杆菌受污染物富集的影响, 在第 60 d 时丰度显著下降, 图 6 中显示拟杆菌在第 20 d 和第 40 d 丰度较高, 与前述细菌结构的分析结果一致, 抗性基因 *marC* 和 *ampG* 均在第 40 d 时达到最高丰度, 随后持续下降, 与拟杆菌的变化趋势关系密切。文献[18]显示不动杆菌门 (*Acinetobacter*) 会促进 ARGs 的合成, 在第 60 d 丰度增至最高, 随后丰度持续下降。据报道, 厚壁菌门 (Firmicutes) 经常与抗生素抗性相关[12], 随循环次数的增加, 丰度呈波动趋势, 第 100 d 的丰度与初始丰度相比下降了 84.66%, 放线菌门 (Actinobacteria) 也因经常产生多重抗性而被发现为一组产生抗生素的细菌, 会驱动 ARGs 的命运[18], 丰度先增后减, 在第 60 d 出现最大降幅, 为 64.38%, 蓝藻门 (Cyanobacteria) 和酸杆菌门 (Acidobacteria)[30] 与 *tetM*、*mefA* 和 *blaCTX* 等抗性基因有关, 前者丰度下降了 85.15%, 而后者在第 80 d 时, 丰度增加至初始的 3.96 倍。在图 6(c) 中, 放线菌门和酸杆菌门的箭头连线长度很长, 表明该菌落与 ARGs 的分布相关性相对更大。

## 2.5 苯环类污染物与 ARGs 的相关性分析

Spearman 秩相关可以用来研究环境因子与基因丰富度之间的相互变化关系, 得到两两之间的相关性和显著性  $P$  值。随着循环次数的增加, 有 21 种抗性基因受到芳香族化合物的显著影响, 其中有 12 种受到极显著影响 ( $P < 0.01$ )。与抗性基因有显著相关性的芳香族化合物主要有芴 (Flu)、菲 (Phe)、蒾 (Chry) 和苯并 [b] 荧蒹 (BbF) 等多环芳烃 (PAHs), 以及甲苯 (TOL) 和乙苯 (EBZ) 等单环芳烃 (MAHs)。有研究证实[12], 与生活污水的单独处理相比, 生活污水与印染废水混合处理过程中, 抗生素抗性基因的丰度相对较高, 印染废水中的有机化合物



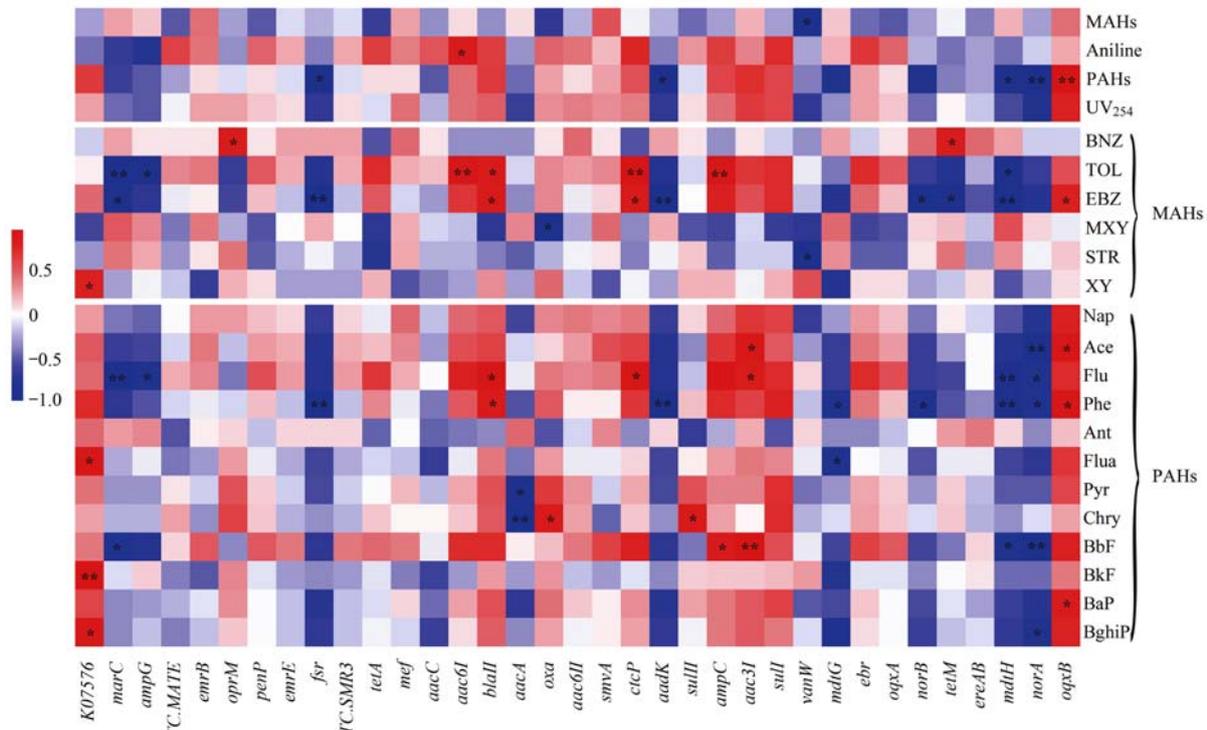
(a) ARGs 与门水平细菌群落相关性; (b) ARGs 与属水平细菌群落相关性; (c) ARGs 与已知相关菌种 CCA 分析

图 6 ARGs 与细菌群落 RDA 和 CCA 相关性分析

Fig. 6 RDA and CCA of the correlation between bacterial community structure and ARGs

可以促进 PP4 质粒的转移(4.3 ~ 219 倍). 如图 7 所示, 12 种多环芳烃对抗性基因 *K07576*、*aac3I* 和 *oqxB* 的影响均为正相关, 对抗性基因 *marC*、*fsr*、*aadK*、*mdtG*、*norB*、*mdtH* 和 *norA* 的影响均为负相关, 但相关性有高低差别. 其中, 苯并[k]荧蒽(BkF)与 *K07576* 呈极显著正相关( $P < 0.01$ ,  $r = 0.926$ ), 芴与 *ampC* ( $P < 0.01$ ,  $r = 0.943$ ) 存在极显著正相关, 与 *marC* 和 *mdtH* 呈极显著负相关( $P < 0.01$ ,  $r = -0.943$ ), 菲与 *fsr*、*aadK* 和 *mdtH* 存在极显著负相关( $P < 0.01$ ,  $r = -0.943$ ). 有两种多环芳烃[萘(Nap)和蒽(Ant)]对抗性基因的转移没有显著相关性. 实

验选取的 6 种单环芳烃类有机物中, 甲苯与抗性基因 *aac6I* ( $P < 0.01$ ,  $r = 0.943$ )、*ctcP* ( $P < 0.01$ ,  $r = 1$ ) 和 *ampC* ( $P < 0.01$ ,  $r = 0.943$ ) 存在极显著正相关, 与抗性基因 *marC* 呈现极显著负相关( $P < 0.01$ ,  $r = -0.943$ ), 乙苯与抗性基因 *fsr*、*aadK* 和 *mdtH* 呈现极显著负相关( $P < 0.01$ ,  $r = -0.943$ ). 结果证明, *K07576* 受到了多环芳烃的正相关影响, 而在循环利用过程中, 多环芳烃得到富集, 这可能是 *K07576* 丰度最高的原因; 然而, 丰度排名第二的 *marC* 基因却受单环芳烃和多环芳烃的极显著负相关影响, 因此, 芳香化合物的作用不是主要的.



热图颜色对应的值为 Spearman 相关系数  $r$ , 介于  $-1 \sim 1$  之间,  $r < 0$  为负相关(蓝色),  $r > 0$  为正相关(红色),

\* 表示显著性检验  $P$  值  $< 0.05$ , \*\* 表示显著性检验  $P$  值  $< 0.01$  [31]

图 7 ARGs 相对丰度变化与芳香族化合物 Spearman 相关关系

Fig. 7 Spearman diagram of relative abundance changes of ARGs and aromatic compounds

### 3 结论

(1) 印染废水生物处理系统的活性污泥中检出 9 大类 52 种 ARGs.  $\beta$ -内酰胺类( $\beta$ -lactam) 抗性基因相对丰度最高, 其中 *K07576* 基因相对丰度最大. 与循环初期相比, 运行末期 ARGs 相对丰度增幅为 6.17%, 未出现显著富集现象.

(2) 芳香族化合物随循环次数的增加逐渐得到富集, 超过 21 种 ARGs 受到芳烃类污染物富集的显著影响, 其中, 6 种 ARGs 与芳烃类污染物的浓度变化极显著正相关, 6 种极显著负相关.

(3) 在印染废水的循环利用过程中, 微生物群落受芳香族化合物富集影响相对丰度显著下降, 其

中与 ARGs 相关的 Firmicutes、Actinobacteria 和 Cyanobacteria 的群落丰度降幅分别为 84.66%, 64.38% 和 85.15%.

#### 参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国环境统计年鉴 2012-2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013-2017.
- [2] Zheng X, Zhang Z X, Yu D W, et al. Overview of membrane technology applications for industrial wastewater treatment in China to increase water supply[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2015, **105**: 1-10.
- [3] Yi L L, Jiao W T, Chen X N, et al. An overview of reclaimed water reuse in China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, **23**(10): 1585-1593.
- [4] 章华丽, 梅荣武. 气浮+生化+气浮提标改造工艺处理印染废水工程实例[J]. 水处理技术, 2016, **42**(9): 133-136. Zhang H L, Mei R W. Application of airfloatation + biochemistry

- + airfloatation combined process in printing and dyeing wastewater treatment for upgrading and reconstruction [J]. *Technology of Water Treatment*, 2016, **42**(9): 133-136.
- [ 5 ] 蒋彬, 王鸿儒, 袁绍春, 等. 印染废水深度处理工程实例 [J]. *工业水处理*, 2018, **38**(11): 96-99.
- Jiang B, Wang H R, Yuan S C, *et al.* Case study on the advanced treatment of printing and dyeing wastewater [J]. *Industrial Water Treatment*, 2018, **38**(11): 96-99.
- [ 6 ] He Y Z, Wang X J, Xu J L, *et al.* Application of integrated ozone biological aerated filters and membrane filtration in water reuse of textile effluents [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **133**: 150-157.
- [ 7 ] Allen H K, Donato J, Wang H H, *et al.* Call of the wild: antibiotic resistance genes in natural environments [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2010, **8**(4): 251-259.
- [ 8 ] Pruden A. Balancing water sustainability and public health goals in the face of growing concerns about antibiotic resistance [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(1): 5-14.
- [ 9 ] Berendonk T U, Manaia C M, Merlin C, *et al.* Tackling antibiotic resistance: the environmental framework [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2015, **13**(5): 310-317.
- [ 10 ] Guo J H, Li J, Chen H, *et al.* Metagenomic analysis reveals wastewater treatment plants as hotspots of antibiotic resistance genes and mobile genetic elements [J]. *Water Research*, 2017, **123**: 468-478.
- [ 11 ] Jiao Y N, Chen H, Gao R X, *et al.* Organic compounds stimulate horizontal transfer of antibiotic resistance genes in mixed wastewater treatment systems [J]. *Chemosphere*, 2017, **184**: 53-61.
- [ 12 ] Huerta B, Marti E, Gros M, *et al.* Exploring the links between antibiotic occurrence, antibiotic resistance, and bacterial communities in water supply reservoirs [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **456-457**: 161-170.
- [ 13 ] Toprak E, Veres A, Yildiz S, *et al.* Building a morbidostat: an automated continuous-culture device for studying bacterial drug resistance under dynamically sustained drug inhibition [J]. *Nature Protocols*, 2013, **8**(3): 555-567.
- [ 14 ] Xia Z J, Wang J, Hu W, *et al.* Improving conjugation efficacy of *Sorangium cellulosum* by the addition of dual selection antibiotics [J]. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 2008, **35**(10): 1157-1163.
- [ 15 ] Zhang P Y, Xu P P, Xia Z J, *et al.* Combined treatment with the antibiotics kanamycin and streptomycin promotes the conjugation of *Escherichia coli* [J]. *FEMS Microbiology Letters*, 2013, **348**(2): 149-156.
- [ 16 ] Alekshun M N, Levy S B. Molecular mechanisms of antibacterial multidrug resistance [J]. *Cell*, 2007, **128**(6): 1037-1050.
- [ 17 ] Jennings M C, Minbiole K P C, Wuest W M. Quaternary ammonium compounds: an antimicrobial mainstay and platform for innovation to address bacterial resistance [J]. *ACS Infectious Diseases*, 2015, **1**(7): 288-303.
- [ 18 ] Yang Y, Li B, Zou S C, *et al.* Fate of antibiotic resistance genes in sewage treatment plant revealed by metagenomic approach [J]. *Water Research*, 2014, **62**: 97-106.
- [ 19 ] Kawasaki K, Maruoka S, Katagami R, *et al.* Effect of initial *MLSS* on operation of submerged membrane activated sludge process [J]. *Desalination*, 2011, **281**: 334-339.
- [ 20 ] 赵云芝, 杨坪, 钱蜀. 液相色谱-串联质谱法测定水中 14 种苯胺类化合物 [J]. *色谱*, 2015, **33**(5): 508-513.
- Zhao Y Z, Yang P, Qian S. Determination of 14 aniline derivatives in water by liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Chinese Journal of Chromatography*, 2015, **33**(5): 508-513.
- [ 21 ] 刁春鹏. 焦化废水处理过程苯系物、苯胺类、重金属污染物的存在及去除特性分析 [D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- Diao C P. Occurrence and removal characteristic of BTEX anilines and heavy metal in coking wastewater during treatment process [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [ 22 ] Martínez J L, Coque T M, Baquero F. What is a resistance gene? Ranking risk in resistomes [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2015, **13**(2): 116-123.
- [ 23 ] Jia B F, Raphenya A R, Alcock B, *et al.* CARD 2017: expansion and model-centric curation of the comprehensive antibiotic resistance database [J]. *Nucleic Acids Research*, 2017, **45**(D1): D566-D573.
- [ 24 ] McArthur A G, Waglechner N, Nizam F, *et al.* The comprehensive antibiotic resistance database [J]. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 2013, **57**(7): 3348-3357.
- [ 25 ] Ma Q, Qu Y Y, Shen W L, *et al.* Bacterial community compositions of coking wastewater treatment plants in steel industry revealed by Illumina high-throughput sequencing [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **179**: 436-443.
- [ 26 ] Jin Q, Hu Z C, Jin Z F, *et al.* Biodegradation of aniline in an alkaline environment by a novel strain of the halophilic bacterium, *Dietzia natronolimnaea* JQ-AN [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **117**: 148-154.
- [ 27 ] Miao R, Wang L, Lv Y T, *et al.* Identifying polyvinylidene fluoride ultrafiltration membrane fouling behavior of different effluent organic matter fractions using colloidal probes [J]. *Water Research*, 2014, **55**: 313-322.
- [ 28 ] 姚鹏城, 陈嘉瑜, 张永明, 等. 废水处理系统中抗生素抗性基因分布特征 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(11): 5024-5031.
- Yao P C, Chen J Y, Zhang Y M, *et al.* Distribution characteristics of antibiotic resistance genes in wastewater treatment plants [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(11): 5024-5031.
- [ 29 ] Jiang Y, Wei L, Yang K, *et al.* Investigation of rapid granulation in SBRs treating aniline-rich wastewater with different aniline loading rates [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **646**: 841-849.
- [ 30 ] Su Y L, Wang J X, Xia H P, *et al.* Comparative network analysis revealing the mechanisms of antibiotic resistance genes removal by leachate recirculation under different hydraulic loadings [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **649**: 318-326.
- [ 31 ] Maritz J S. *Distribution-free statistical methods* [M]. London: Chapman and Hall, 1981.

## CONTENTS

Advances and Challenges in Biosafety Research for Urban Environments .....	SU Jian-qiang, AN Xin-li, HU An-yi, <i>et al.</i> (2565)
Key Problems and Novel Strategy of Controlling Emerging Trace Organic Contaminants During Municipal Wastewater Reclamation .....	WANG Wen-long, WU Qian-yuan, DU Ye, <i>et al.</i> (2573)
Mechanisms Summary and Potential Analysis of EPS as a Flame Retardant .....	HAO Xiao-di, ZHAO Zi-cheng, LI Ji, <i>et al.</i> (2583)
Concentrations, Sources, and Health Risks of PM <sub>2.5</sub> Carrier Metals in the Beijing Urban Area and Suburbs .....	ZHOU An-qi, LIU Jian-wei, ZHOU Xu, <i>et al.</i> (2595)
MAIAC AOD and PM <sub>2.5</sub> Mass Concentrations Characteristics and Correlation Analysis in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas .....	JIN Jian-nan, YANG Xing-chuan, YAN Xing, <i>et al.</i> (2604)
Formation and Prevention of Secondary Nitrate in PM <sub>2.5</sub> in Tianjin .....	XIAO Zhi-mei, WU Ting, WEI Yu-ting, <i>et al.</i> (2616)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitro Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM <sub>2.5</sub> of Nanjing, China .....	FU Yin-yin, WEN Hao-zhe, WANG Xiang-hua, <i>et al.</i> (2626)
Spatio-temporal Patterns and Potential Sources of Absorbing Aerosols in the Fenwei Plain .....	LIU Min-xia, LI Liang, YU Rui-xin, <i>et al.</i> (2634)
Sources Apportionment of Oxygenated Volatile Organic Compounds (OVOCs) in a Typical Southwestern Region in China During Summer .....	CHEN Mu-lan, WANG Sai-nan, CHEN Tian-shu, <i>et al.</i> (2648)
Aqueous-phase Oxidation of Dissolved Organic Matter (DOM) from Extracts of Ambient Aerosols .....	TAO Ye, CHEN Yan-tong, LI Nan-wang, <i>et al.</i> (2659)
Changes and Potential Sources of Atmospheric Black Carbon Concentration in Shanghai over the Past 40 Years Based on MERRA-2 Reanalysis Data .....	CAO Shan-shan, DUAN Yu-sen, GAO Chan-chan, <i>et al.</i> (2668)
Spatio-Temporal Evolution Characteristics and Source Apportionment of O <sub>3</sub> and NO <sub>2</sub> in Shijiazhuang .....	WANG Shuai, NIE Sai-sai, FENG Ya-ping, <i>et al.</i> (2679)
Applying Photochemical Indicators to Analyze Ozone Sensitivity in Handan .....	NIU Yuan, CHENG Shui-yuan, OU Sheng-ju, <i>et al.</i> (2691)
Spatiotemporal Distribution of Aerosol Optical Depth Based on Landsat Data in the Hinterland of the Guanzhong Basin and Its Relationship with Urbanization .....	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, ZHANG Xiu, <i>et al.</i> (2699)
Multidimensional Verification of Anthropogenic VOCs Emissions Inventory Through Satellite Retrievals and Ground Observations .....	WANG Yue, WEI Wei, REN Yun-ting, <i>et al.</i> (2713)
Estimation of the SOA Formation Potential of the National Trunk Highway in Central Plains Urban Agglomeration .....	WANG Na-ping, LI Hai-ping, ZHANG Fan (2721)
Economic Benefit of Air Quality Improvement During Implementation of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan in Beijing .....	LU Ya-ling, FAN Zhao-yang, JIANG Hong-qiang, <i>et al.</i> (2730)
Emission Performance Quantitative Evaluation and Application of Industrial Air Pollution Sources .....	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (2740)
Screening and Sequencing High-risk Antibiotics in China's Water Environment Based on Ecological Risks .....	ZHOU Li, LIU Shan, GUO Jia-hua, <i>et al.</i> (2748)
China's Reuse Water Development and Utilization Potential Based on the RDA-REM Model .....	ZHENG Jin-tao, MA Tao, LIU Jiu-fu, <i>et al.</i> (2758)
Characteristic Analysis of SWAT Model Parameter Values Based on Assessment of Model Research Quality .....	RONG Yi, QIN Cheng-xin, DU Peng-fei, <i>et al.</i> (2769)
Sensitivity Analysis of Boundary Load Reduction in a Large Shallow Lake Water Quality Model .....	WANY Ya-ning, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (2778)
Comparison of Available Nitrogen and Phosphorus Characteristics in the Land-Water Transition Zone of Different Watersheds and Their Environmental Significance .....	ZHU Hai, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2787)
Analysis of Spatial-Temporal Variation Characteristics of Potential Non-point Source Pollution Risks in the Upper Beiyun River Basin Using Different Weighting Methods .....	LI Hua-lin, ZHANG Jian-jun, ZHANG Yao-fang, <i>et al.</i> (2796)
Characteristics of Runoff-related Total Nitrogen and Phosphorus Losses Under Long-term Fertilization and Cultivation on Purple Soil Sloping Croplands .....	WU Xiao-yu, LI Tian-yang, HE Bing-hui (2810)
Hydrochemistry and Its Controlling Factors and Water Quality Assessment of Shallow Groundwater in the Weihe and Jinghe River Catchments .....	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (2817)
Characteristics and Drivers of Dissolved Carbon Dioxide and Methane Concentrations in the Nantiaoxi River System in the Upper Reaches of the Taihu Lake Basin During Summer-Autumn .....	LIANG Jia-hui, TIAN Lin-lin, ZHOU Zhong-yu, <i>et al.</i> (2826)
Nitrogen Distribution and Inorganic Nitrogen Diffusion Flux in a Shallow Lake During the Low Temperature Period: A Case Study of the Baiyangdian Lake .....	WEN Yan, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang (2839)
Effects of Sediment Microenvironment on Sedimentary Phosphorus Release Under Capping .....	CHEN Shu-tong, LI Da-peng, XU Chu-tian, <i>et al.</i> (2848)
Coadsorption of Heavy Metal and Antibiotic onto Humic Acid from Polder River Sediment .....	XUE Xiang-dong, YANG Chen-hao, YU Jian-lin, <i>et al.</i> (2856)
Effects of Two PPCPs on Nitrification in Sediments in the Yarlung Zangbo River .....	LING Xin, XU Hui-ping, LU Guang-hua (2868)
Wastewater Treatment Effects of Ferric-carbon Micro-electrolysis and Zeolite in Constructed Wetlands .....	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, ZHANG Yao-yu, <i>et al.</i> (2875)
CDS-BOC Nanophotocatalyst Activating Persulfate Under Visible Light for the Efficient Degradation of Typical PPCPs .....	LEI Qian, XU Lu, AI Wei, <i>et al.</i> (2885)
Preparation of pg-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /BiOBr/Ag Composite and Photocatalytic Degradation of Sulfamethoxazole .....	YANG Li-wei, LIU Li-jun, XIA Xun-feng, <i>et al.</i> (2896)
Sodium Alginate Loading of Zero-Valent Iron Sulfide for the Reduction of Cr(VI) in Water .....	WANG Xu, YANG Xin-nan, HUANG Bi-jian, <i>et al.</i> (2908)
Adsorption Mechanism of Cadmium by Superparamagnetic Nano-Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @SiO <sub>2</sub> Functionalized Materials .....	ZHANG Li-zhi, YI Ping, FANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2917)
Pollution Characteristics and Removal of Typical Pharmaceuticals in Hospital Wastewater and Municipal Wastewater Treatment Plants .....	YE Pu, YOU Wen-dan, YANG Bin, <i>et al.</i> (2928)
Abundance Change of Antibiotic Resistance Genes During PDWW Recycling and Correlations with Environmental Factors .....	XU Yao-yao, WANG Rui, JIN Xin, <i>et al.</i> (2937)
Simultaneous Domestication of Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules .....	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (2946)
Long-term Storage and Rapid Activity Recovery of ANAMMOX Granular Sludge .....	LI Dong, LIU Ming-yang, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (2957)
Migration and Environmental Effects of Heavy Metals in the Pyrolysis of Municipal Sludge .....	JIANG Yuan-yuan, WANG Yan, DUAN Wen-yang, <i>et al.</i> (2966)
Profiling of Antibiotic Resistance Genes in Different Croplands .....	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (2975)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Cattle Farms in Ningxia .....	ZHANG Jun-hua, CHEN Rui-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (2981)
Effects of Temperature and Stirring on the Changes of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Anaerobic Digestion of Dairy Manure .....	XU Ji-fei, ZHANG Qiu-ping, ZHU Tian-jiao, <i>et al.</i> (2992)
Effects of Wheat Straw-derived Biochar Application on Soil Carbon Content Under Different Tillage Practices .....	LIU Zhen-jie, LI Peng-fei, HUANG Shi-wei, <i>et al.</i> (3000)
Spatial Patterns of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Their Influencing Factors in a Typical Agro-pastoral Ecotone .....	ZHANG Yan-jiang, WANG Jun-peng, WANG Yu, <i>et al.</i> (3010)
Spatial Distribution Characteristics, Pollution, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals Around Mercury Mining Areas .....	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (3018)
Interaction and Mechanism Between Conditioning Agents and Two Elements in the Soil Enriched with Phosphorus and Cadmium .....	HUANG Yang, HU Xue-yu, CAO Kun-kun, <i>et al.</i> (3028)
Mechanism of S-allyl-L-cysteine Alleviating Cadmium Stress in Seedling Roots and Buds of Rice Seedlings .....	CHENG Liu-long, HUANG Yong-chun, WANG Chang-rong, <i>et al.</i> (3037)
Consecutive 4-year Elevated Atmospheric CO <sub>2</sub> on Shaped Microbial Communities in the Rhizosphere Soil of <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Seedlings Grown in Pb-contaminated Soils .....	JIA Xia, Lkhagvajargal Khadkhurel, ZHAO Yong-hua, <i>et al.</i> (3046)
Biodegradation of Polystyrene by <i>Geobacillus stearothermophilus</i> .....	XING Rui-zhi, ZHAO Zi-qiang, ZHAO Wen-qi, <i>et al.</i> (3056)
Micro-morphological Characteristics of Particles on Holly and Ligustrum Leaf Surfaces and Seasonal Changes in Bacterial Communities .....	LI Hui-juan, XU Ai-ling, QIAO Feng-lu, <i>et al.</i> (3063)
Effects of Roxithromycin on Reproduction, Growth, and Anti-oxidation System of <i>Daphnia magna</i> .....	ZHANG Ling-yu, LIU Jian-chao, LENG Yang, <i>et al.</i> (3074)
Relationship Between Relative Crop Yield/Woody Plant Biomass and Ground-level Ozone Pollution in China .....	FENG Zhao-zhong, PENG Jin-long (3084)