

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第6期

Vol.39 No.6

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京市二次有机气溶胶生成潜势的日变化规律 刘俊, 楚碧武, 贺泓 (2505)

太原冬季 PM_{2.5} 影响霾污染的关键尺度谱特征 杨素英, 余欣洋, 赵秀勇, 李义宇, 孙洪娉, 田芷洁, 李岩, 吴尚, 王梓航 (2512)

盘锦市冬季 PM_{2.5} 水溶性离子特征及来源分析 张蕾, 姬亚芹, 王士宝, 赵静琦, 张军, 李越洋, 张伟 (2521)

广州市天河区 2016 年雨季挥发性有机物污染特征及来源解析 古颖纲, 虞小芳, 杨闻达, 田智林, 李梅, 程鹏 (2528)

热带树木燃烧颗粒物中脱水糖和醋非烯的排放特征 金诚妙, 崔敏, 韩勇, 陈颖军, 唐娇, 李军, 张干 (2538)

天津地区污染天气分析中垂直扩散指标构建及运用 蔡子颖, 韩素芹, 张敏, 姚青, 刘敬勇 (2548)

亚热带农田和林地大气氨湿沉降与混合沉降比较 朱潇, 王杰飞, 沈健林, 肖润林, 王娟, 吴金水, 李勇 (2557)

京津冀地区黄标车政策的总量减排效益评估 卢亚灵, 周佳, 程曦, 张伟, 蒋洪强 (2566)

北京北运河河流生态系统健康评价 顾晓昀, 徐宗学, 刘麟菲, 殷旭旺, 王汨 (2576)

长江武汉段丰水期水体和沉积物中多环芳烃及邻苯二甲酸酯类有机污染物污染特征及来源分析 董磊, 汤显强, 林莉, 邴超, 黎睿, 吴敏 (2588)

福建省敖江下游抗生素抗性基因分布特征 张丹丹, 郭亚平, 任红云, 周昕原, 黄福义, 张娴 (2600)

三峡库区支流河口沉积物重金属分布特征及风险评价 方志青, 陈秋禹, 尹德良, 王志康, 孙涛, 王永敏, 谢德体, 王定勇 (2607)

三峡水库蓄水至 175 m 后干流沉积物理化性质与磷形态分布特征 潘婵娟, 黎睿, 汤显强, 夏振尧, 李青云, 杨文俊, 许文年 (2615)

基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源 孔晓乐, 王仕琴, 丁飞, 梁慧雅 (2624)

天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响 孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 李恒鹏, 李慧贇 (2632)

重庆雪玉洞洞穴滴水水文地球化学时空变化特征及其环境意义 曾泽, 蒋勇军, 吕现福, 曾思博, 胡刘焯, 雷佳琪 (2641)

岩溶地表河旱季有色溶解有机质组成及来源: 以金佛山碧潭河为例 刘跃, 贺秋芳, 刘宁坤, 刘九程, 王正雄, 段世辉 (2651)

托来河流域不同海拔降水稳定同位素的环境意义 李永格, 李宗省, 冯起, 肖莲柱, 吕越敏, 桂娟, 袁瑞丰, 张百娟 (2661)

五里峡水库初级生产力对水气界面二氧化碳和甲烷排放速率时空变化的影响 彭文杰, 李强, 宋昂, 靳振江 (2673)

西南山区典型河道型水库藻类功能群时空演替特征及其影响因素: 以紫坪铺水库为例 张耀文, 李洪, 李嘉, 宋洋, 张陵蕾, 李永, 蒲迅赤, 黄文典 (2680)

四明湖水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子 郑诚, 陆开宏, 徐镇, 郑志明, 朱津永 (2688)

营养盐添加对水华蓝藻——卵孢金胞藻生长和竞争影响的原位实验 王梦梦, 张玮, 张军毅, 尚光霞, 杜彩丽, 王丽卿 (2698)

植物配置与进水碳氮比对沉水植物塘水质净化效果的影响 刘森, 陈开宁 (2706)

江汉平原水稻灌排单元沟渠中氮磷变化特征及其环境风险 华玲玲, 张富林, 翟丽梅, 刘宏斌, 范先鹏, 王洪霞 (2715)

冀西北典型北方小城镇污水处理厂中抗生素的分布和去除 柴玉峰, 张玉秀, 陈梅雪, 王瑞, 柳蒙蒙, 郑嘉熹, 魏源送 (2724)

臭氧-粉末炭联用作为预处理缓解膜污染的效果与机制 董秉直, 高昊旸, 胡孟柳 (2732)

中试 SAD-ASBR 系统处理含盐废水的启动与工艺特性 于德爽, 唐佳佳, 张军, 王晓霞, 赵红, 韩长民, 孙捷 (2740)

海藻酸钙/聚 N-异丙基丙烯酰胺半互穿网络凝胶球的除磷性能 曾学阳, 骆华勇, 张耀坤, 荣宏伟, 曾子君, 钟广汇 (2748)

玉米淀粉废水短程硝化快速启动及其稳定性 龙北生, 刘迅雷, 刘红波, 杨靖新, 袁树森 (2756)

硝化细菌的培养及包埋固定化中试 杨宏, 胡银龙 (2763)

不同运行策略下厌氧氨氧化的脱氮性能 安芳娇, 彭永臻, 董志龙, 邵兆伟, 赵智超, 黄剑明, 陈永志 (2770)

高含固污泥厌氧消化中蛋白质转化规律 詹瑜, 施万胜, 赵明星, 许之扬, 阮文权, 宋联, 朱葛 (2778)

污泥富磷堆肥前后重金属赋存形态及释放能力变化 李玉, 方文, 祁光霞, 魏勇红, 刘建国, 李润东 (2786)

丝状菌污泥膨胀对脱氮除磷功能菌群的影响 高晨晨, 游佳, 陈轶, 郑兴灿, 尚巍, 张文安 (2794)

同步去除并富集磷酸盐生物膜驯化过程中微生物种群分析 孟璇, 潘杨, 章豪, 廖恒弘, 徐林建, 冯鑫, 单捷 (2802)

四环素对人粪便好氧堆肥过程及微生物群落演替的影响 时红蕾, 王晓昌, 李倩, 刘源 (2810)

长期定位有机物料还田对关中平原夏玉米-冬小麦轮作土壤 NO 排放的影响 袁梦轩, 王晋峰, 谭跃慧, 魏静, 杨学云, 顾江新 (2819)

菌渣还田量对紫色水稻土净温室气体排放的影响 祁乐, 高明, 周鹏, 王富华, 高泳钦, 陈仕奇, 吴思琪, 邓静霖, 文婷 (2827)

¹³C 脉冲标记法定量冬小麦光合碳分配及其向地下的输入 孙昭安, 陈清, 韩笑, 吴文良, 孟凡乔 (2837)

西南喀斯特区植被恢复对土壤氮素转化通路的影响 杨怡, 欧阳运东, 陈浩, 肖孔操, 李德军 (2845)

江苏海岸带土壤重金属来源解析及空间分布 吕建树, 何华春 (2853)

黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布 于元赫, 吕建树, 王亚梦 (2865)

典型小城市土壤重金属空间异质性及风险评价: 以临安市为例 郑晴之, 王楚栋, 王诗涵, 林子也, 赵科理, 吴东涛, 傅伟军 (2875)

西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价 周艳, 陈楠, 邓绍坡, 王金忠, 张胜田, 龙涛, 李群, 林玉锁, 吴运金 (2884)

典型山核桃产区土壤重金属空间异质性及风险评价 张红桔, 赵科理, 叶正钱, 许斌, 赵伟明, 顾晓波, 张华锋 (2893)

生物炭添加对湿地植物生长及氧化应激响应的影响 黄磊, 陈玉成, 赵亚琦, 肖广全, 杨志敏 (2904)

厌氧条件水稻土铁对砷释放的影响 王欣, 钟松雄, 陈志良, 何宏飞, 董家华, 陈晓丽 (2911)

矿业活动影响区稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险 田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 余元元, 庞瑞, 周浪, 宋波 (2919)

硅酸钙和生物腐殖肥复配对葱生长和镉吸收的影响 刘德玲, 尹光彩, 陈志良, 林亲铁, 刘千钧, 钟松雄, 黄玲, 张建强 (2927)

吉林四平设施土壤和蔬菜中重金属的累积特征 李莲芳, 朱昌雄, 曾希柏, 李红娜, 叶婧, 李峰, 吴翠霞 (2936)

喷施锌肥对油菜镉生物可给性的影响 王林, 谷朋磊, 李然, 徐应明, 孙约兵, 梁学峰, 代晶晶 (2944)

贵州草海底栖动物汞分布及其对沉积物汞的响应特征 许议元, 曾玲霞, 何天容, 陈梦瑜, 钱晓莉, 李振吉 (2953)

废旧轮胎翻新过程中多环芳烃排放及健康风险 付建平, 赵波, 黎玉清, 刘沙沙, 尹文华, 黄锦琼, 周长风, 张素坤, 贺德春, 韩静磊 (2963)

县级尺度的重庆市碳排放时空格局动态 孙秀峰, 施开放, 吴健平 (2971)

颗粒尺寸对纳米氧化物环境行为的影响 严玉鹏, 唐亚东, 万彪, 王小明, 刘凡, 冯雄汉 (2982)

防晒剂的海洋环境行为与生物毒性 朱小山, 黄静颖, 吕小慧, 杜永芬, 蔡中华 (2991)

《环境科学》征订启事 (2527) 《环境科学》征稿简则 (2723) 信息 (2826, 2852, 2910)

同步去除并富集磷酸盐生物膜驯化过程中微生物种群分析

孟璇^{1,2}, 潘杨^{1,2,3*}, 章豪^{1,2}, 廖烜弘^{1,2}, 徐林建^{1,2}, 冯鑫^{1,2}, 单捷^{1,2}

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 苏州科技大学环境生物技术研究所, 苏州 215009; 3. 江苏省环境科学与工程重点实验室, 苏州 215009)

摘要: 本实验以同步去除并回收高浓度磷酸盐溶液为目标, 开展了以挂式尼龙为生物载体的生物膜驯化培养聚磷菌的人工配水实验研究. 通过扫描电镜(SEM)和 Illumina MiSeq 高通量测序分析技术研究了生物膜驯化过程中生物膜内菌群形态、优势菌及物种多样性变化并验证了短时间内在该常规生物膜上回收高浓度磷酸盐的可行性. 反应器运行 10 d 后挂膜成功, COD 出水 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 出水磷浓度接近于零, 磷去除率 95% 以上, 并在该水平上稳定运行 40 d. SEM 结果显示 50 d 时微生物菌落均匀饱满, 外形规则, 轮廓清晰, 成球状. MiSeq 高通量测序发现优势菌门包括变形菌门(Proteobacteria)、绿弯菌门(Chloroflexi)、拟杆菌门(Bacteroidetes)、放线菌门(Actinobacteria)、Ignavibacteriae 门、硝化螺旋菌门(Nitrospirae). 其中变形菌门从 47% 增长至 58%, 占主导地位. 而优势聚磷菌为 Rhodocyclaceae, 从 17.9% 增长至 28.9%. 回收阶段, 通过提高进水磷酸盐浓度和厌氧阶段溶液中 COD 浓度, 富磷溶液浓度从 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升高到 $82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 在生物膜上实现磷酸盐的富集, 并且浓度满足鸟粪石法磷回收的要求.

关键词: 生物膜; 同步去除回收磷酸盐; 聚磷菌; 高通量测序

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)06-2802-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201710048

Microbial Population Dynamics During Domestication and Cultivation of Biofilm to Remove and Enrich Phosphate

MENG Xuan^{1,2}, PAN Yang^{1,2,3*}, ZHANG Hao^{1,2}, LIAO Xuan-hong^{1,2}, XU Lin-jian^{1,2}, FENG Xin^{1,2}, SHAN Jie^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Environment Biotechnology Research Institute, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Environment Science and Engineering, Suzhou 215009, China)

Abstract: The purpose of this study was to develop a method to remove and recover high concentration phosphate solutions from wastewater. An experiment was carried out to cultivate and enrich phosphorus accumulating organisms (PAOs) in the biofilm with nylon as the biological carrier using artificial water distribution. Microflora morphology, species diversity, and the genetic relationship of biofilm during the process of biofilm domestication were studied by scanning electron microscopy (SEM) and MiSeq high-throughput sequencing. In addition, the feasibility of recycling a high concentration of phosphate in the conventional biofilm within a short time was validated. The membrane was hung in the biological carrier when the reactor was operated for 10 d. After the hanging of the film succeeded, the effluent COD was below $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the effluent phosphorus was close to zero, and the removal efficiency of phosphorus reached to above 95%. The operation was stable at this level for 40 d. The results from the SEM indicated that the microbial morphology in the biofilm was uniform with full oval-shaped spheres with a clear profile. MiSeq high-throughput sequencing indicated that the dominant phylum in the reactor included Proteobacteria, Chloroflexi, Bacteroidetes, Actinobacteria, Ignavibacteriae, and Nitrospirae. Proteobacteria, as the dominant genera, increased from 47% to 58%. Rhodocyclaceae, as the dominant phosphorus accumulating bacteria, increased from 17.9% to 28.9%. During the recovery period, the concentration of the phosphorus solution increased from $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to $82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ by increasing the influent phosphate concentration and the COD concentration in the anaerobic phase, meeting the requirement of phosphorus recovery with the struvite method.

Key words: biofilm; remove and enrich phosphorus; phosphorus accumulating organisms (PAOs); MiSeq high-throughput sequencing

自然界天然磷矿石因开采而逐年减少, 促进了废水中回收磷技术的发展^[1-3]. 由于城市生活污水中磷酸盐的浓度较低, 不适合直接使用物理或化学等方法回收. 现行的磷回收技术主要分为两种, 以 Phostrip 侧流磷回收为代表的悬浮生长系统磷回收

收稿日期: 2017-10-10; 修订日期: 2017-12-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401108); 江苏省自然科学基金项目(BK20171219); 江苏省高校自然科学基金重大项目(14KJA610001); 国家自然科学基金项目(51778390)

作者简介: 孟璇(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染治理, E-mail: 619348533@qq.com

* 通信作者, E-mail: panyang@mail.usts.edu.cn

法^[4]和以生物膜法为代表的附着生长系统磷回收法. Phostrip 侧流磷回收存在污泥消解成本较高, 不易从固体物中分离出 HAP 等缺陷^[5]. 而以生物膜法为代表的附着生长系统因有以下优点而逐渐引起人们的关注: 结构紧凑、占地小; 耐冲击负荷能力强; 反应器厌氧/好氧段时长可进行单独控制; 同时可以避免因丝状菌生长引起的污泥流失^[6~8]. 然而目前生物膜法磷回收研究仅限于曝气生物滤池. Tian 等^[9]和 Kodera 等^[10]分别在生物滤池进行磷回收实验. 但曝气生物滤池容易堵塞、需要定期反冲洗和对进水的悬浮固体浓度要求严格等局限, 工艺发展缓慢且受限.

本研究以常规填料挂式尼龙作为生物膜载体形成厌氧/好氧交替生物膜反应器, 面向未来城市污水处理厂进行磷回收实验, 填料廉价易得, 节能环保. 采用人工配水模拟城市生活废水, 在驯化生物膜过程中, 通过 MiSeq 高通量测序技术探究生物膜驯化过程中微生物种群特性以及优势聚磷菌的变化. 并通过改变进水负荷, 如进水磷浓度, COD 浓度等因素, 探究富集高浓度磷酸盐的可能性.

1 材料与方法

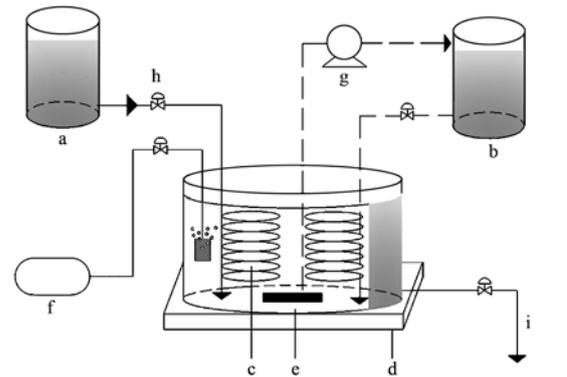
1.1 反应器装置

实验是在一个 2L 的容器中进行. 该系统由 2 串尼龙、一个 30 L 好氧进水容器和一个 30 L 的厌氧进水容器(富集罐)组成, 如图 1 所示. 在厌氧阶段, 综合废水经重力从厌氧进水罐流入反应器, 底部的聚磷菌消耗有机底物并释放磷酸盐, 废水通过重力排出. 在厌氧阶段结束时, 反应器切换到好氧阶段, 好氧罐由重力进水, 空压机曝气以促进有氧环境. 磷酸盐被反应器中 PAOs 吸收, 处理后的废水由重力排出. 在进行磷回收时, 反应器的厌氧出水由泵 1 泵入厌氧进水罐(富集罐). 在厌氧阶段, 反应器中充满了循环液和有机基质. 通过重复交替操作, PAOs 在反应器内被富集, 在富集罐中的磷酸盐浓度越来越高. 本研究中出水和进水都是由泵泵入.

1.2 进水和运行条件

1.2.1 进水条件

进水为合成废水, 采用乙酸钠作为碳源. 驯化阶段合成废水的水质主要指标为: 好氧进水, $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ COD, $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$, $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, 少量 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{EDTA} \cdot 2\text{Na}$ 和微量元素, 加入 NaHCO_3 调节进水 pH 至



a. 好氧进水罐; b. 回收罐(厌氧进水罐); c. 尼龙填料; d. 磁力搅拌器; e. 转子; f. 曝气装置; g. 泵; h. 控制阀; i. 出水管

图 1 实验装置示意

Fig. 1 Experimental device signal

7.5; 厌氧进水为: $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ COD, $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, 自然 pH 值, 少量 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{EDTA} \cdot 2\text{Na}$ 和微量元素^[10]. 富集阶段补充磷酸盐和 COD 浓度.

1.2.2 运行时间和条件

生物膜反应器厌氧和好氧交替运行, 时间分别为 6 h ^[11], 反应器进水流量 $119 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 进水时间约 15 min , 保持容器底部转子时刻转动使反应器中的溶液处于均匀混合状态. 本工艺好氧阶段的曝气量控制在 $(3 \pm 0.5) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 通过水浴加热将温度控制在 25°C .

1.3 分析方法

1.3.1 常规监测项目

水质监测指标有: COD 采用重铬酸钾法测定; $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 采用钼锑抗分光光度法测定; $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 采用纳氏试剂分光光度法测定; DO 采用 Inlab OXI7300 溶氧仪测定; pH 采用 Inlab OXI73 00 pH 计测定.

1.3.2 扫描电镜

取 0、40、50 d 厌氧段泥样分别置于 2.5% 戊二醛溶液中, 4°C 固定过夜, 经过梯度浓度的乙醇溶液(10%、20%、40%、60%、80% 和 100% 这 6 种浓度)脱水处理后用丙酮处理, 分别用体积比为 1:1 和 3:1 的包埋剂与丙酮的混合液处理样品 1 h 和 3 h, 最后用包埋剂处理样品过夜, 将渗透处理的样品包埋起来, 70°C 加热过夜, 即得到包埋好的样品, 样品在 Reichert 超薄切片机中切片, 获得 $70 \sim 90 \text{ nm}$ 的切片, 用柠檬酸铅溶液和醋酸双氧铀 50% 乙醇饱和溶液各染色 15 min, 再用 FEI2500 型扫描电镜观察^[9].

1.3.3 MiSeq 高通量测序分析方法

本实验采用的标准品来源均为尼龙生物膜反应

器. 污泥取样点为系统运行的第 0、40、50 d 的厌氧段污泥. 活性污泥泥样取出后, 14 000 g 离心 2 min, 去除上清液, 置于 $-80^{\circ}C$ 保存. 采用试剂盒 (Fast DNA Spin kit for soil, MP, USA) 对 DNA 进行提取. 提取后的 DNA 通过 Nanodrop Spectrophotometer ND-1000 (Thermo Fisher Scientific, USA) 测量核酸浓度及纯度, 结果通过 1% 的琼脂糖电泳检测.

采用细菌 16S V4-V5 区通用引物, 前端引物 519F (5'-CAGCMGCCGCGTAATW-3'), 后端引物 907R (5'-CCGTCAATTCMTTTRAGTTT-3'), PCR 采用 20 μL 的反应体系, 2 μL 10 \times Buffer、2 μL dNTP (浓度为 100 $mmol \cdot L^{-1}$)、1 μL DNA 模板 (10 $ng \cdot \mu L^{-1}$)、每种引物各 1 μL (10 $\mu mmol \cdot L^{-1}$)、0.2 μL Taq 酶和 12.2 μL 无菌水. 扩增程序是 PCR 扩增采用 $94^{\circ}C$ 预变性 3 min; $94^{\circ}C$ 变性 40 s, $56^{\circ}C$ 60 s, $72^{\circ}C$ 60 s, 共 29 个循环, $72^{\circ}C$ 延伸 10 min. 扩增产物通过 2% 琼脂糖电泳检测.

采用 Illumina MiSeq 测序仪进行 PE 300 测序. 下机数据按照各样本的 Barcode 序列对原始数据进行拆分, 拆分过程中不允许 Barcode 错配; 对单个样本的双端测序结果采用 FLASH 进行拼接; 对拼接结果进行质控, 采用 Uparse 去除平均质量分数小于 30% 的序列并去除嵌合体序列; 采用 Uparse 对序列按照 0.97 的相似度聚类获得 OUT, 采用 Uclust 方法将代表序列比对到 Silva 数据库进行物种注释. 为避免采样效率对微生物群落分析的影响, 对各样

本的序列数目按照各样本中最少的序列数进行随机抽样, 随机抽样结果用于下游的物种丰度比较、 α 多样性与 β 多样性计算以及其它生态统计分析.

2 结果与讨论

2.1 生物膜驯化

采用活性污泥法进行挂膜^[12]. 驯化阶段进水 COD 为 200 $mg \cdot L^{-1}$, $PO_4^{3-}-P$ 为 5 $mg \cdot L^{-1}$, 结果如图 2 所示, 运行初期, 出水磷浓度, COD 浓度较高, 反应器运行 10 d 后, 厌氧好氧出水 COD 均在 50 $mg \cdot L^{-1}$ 以下, 出水磷浓度低于 0.5 $mg \cdot L^{-1}$, 去除率 95% 以上, 随着反应器运行, 出水磷浓度接近于零, 在该处理水平连续稳定运行了 40 d. 出水条件能达到排水一级 A 标准的要求且稳定性好. 在反应器进水水质有波动的情况下依旧保持较好的出水情况, 证明反应器有一定的抗冲击负荷能力. Tian 等^[9]在厌氧/好氧交替生物滤池生物膜驯化运行实验中, 进水磷浓度为 10 ~ 15 $mg \cdot L^{-1}$, COD 浓度为 100 ~ 150 $mg \cdot L^{-1}$, 运行稳定后出水磷浓度在 1 $mg \cdot L^{-1}$ 左右. Kodera 等^[10]以好氧/厌氧交替的生物滤池进行生物膜驯化磷回收实验, 进水 $PO_4^{3-}-P$ 浓度 5 $mg \cdot L^{-1}$, COD 为 100 ~ 200 $mg \cdot L^{-1}$, 运行 90 d, 反应器稳定, 磷去除率 50% 左右. 从除磷效率和驯化时间上看, 以挂式尼龙作为生物膜载体形成厌氧/好氧交替生物膜反应器除磷效率高, 驯化时间短.

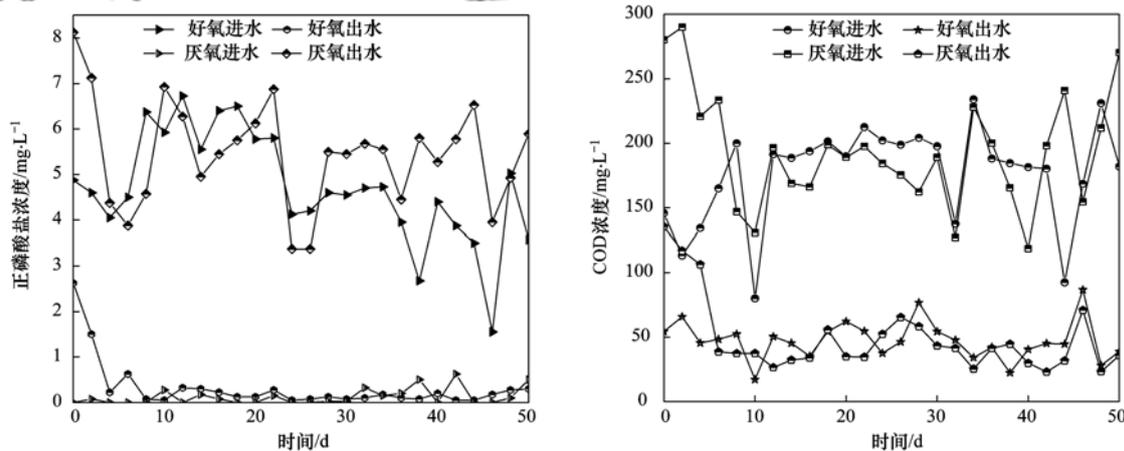


图 2 驯化阶段常规数据监测曲线

Fig. 2 Conventional data monitoring curve during the acclimation phase

2.2 聚磷生物膜磷回收

在反应器运行 50 d 后, 以磷去除为前提, 进行磷回收实验探究. 厌氧出水泵进回收罐, 并作为下一阶段厌氧进水. 在 0 ~ 24 d, 进水 COD 为 200

$mg \cdot L^{-1}$, $PO_4^{3-}-P$ 为 5 $mg \cdot L^{-1}$, 如图 3(a) 所示. 在 0 ~ 10 d, 富集溶液中正磷酸盐浓度在 0 ~ 10 $mg \cdot L^{-1}$, 呈逐渐上升状态, 由于回收液浓度初始值较低因此上升快. 在 11 ~ 18 d, 磷酸盐浓度区间在 10 ~ 18

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,呈阶梯上升状态,此时的回收液浓度相对较高,对磷的释放开始有一定的抑制作用;在 19 ~24 d,浓度区间在 $18\sim 40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的阶段,呈现波动上升状态,较高的磷浓度已经开始影响磷溶液的磷吸收方向,此时回收液浓度已经达到瓶颈。

在反应器运行 25 d 后,如图 3(b)所示,提高进水磷浓度在 $12\sim 16\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,COD 仍为 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,富磷溶液的正磷酸盐浓度提高了 80%,稳定在 $45\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上,实现了富磷溶液浓度在原有状态下的第一次变化,且以后较长一段时间回收液的浓度在 $55\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右波动,认为此时回收液浓度可能再次达到阶段瓶颈。

在第 48 d 时,如图 3(c)所示,降低进水磷浓度至 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,连续两天通过向富磷溶液中投加 $1\ 200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 COD 浓度,富磷溶液的正磷酸盐浓度提高了 77.78%,最高达到 $82\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,实现了富

磷溶液浓度的第二次变化,随着 COD 的不断消耗最后浓度保持在 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 不再下降。富磷回收液的浓度降低到了 $58\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,后续浓度稳定在该值,回收液浓度达到鸟粪石法回收磷的标准($50\sim 58\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。

张顺等^[13]在研究生物膜吸收并蓄积废水中的磷时发现,采用定期补充碳源方式诱导生物滤池内聚磷菌群(PAOs)充分释磷,可刺激形成高浓度的磷回收液。Wang 等^[14]通过数学模型计算证实高的碳源补给更有利于厌氧磷的释放。Tian 等^[9]在研究好氧/厌氧交替生物滤池强化生物除磷时表明,碳源刺激和较高浓度的磷酸盐进水有利于获取高浓度的磷酸盐回收液,结果与本实验相符,为获取高浓度磷溶液提供研究方向。但以提高进水磷酸盐浓度促进磷溶液回收导致出水磷浓度过高,无法达到同步去除的目的。

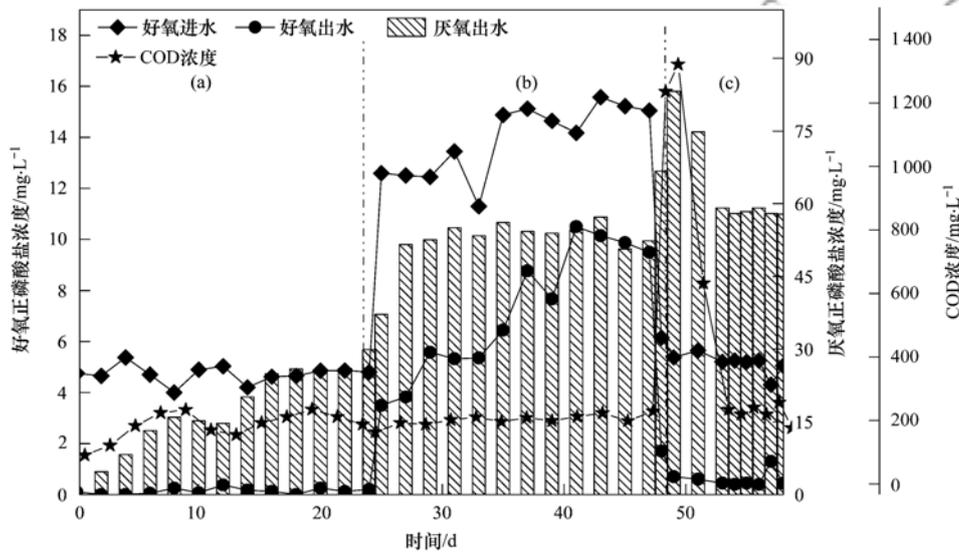


图 3 磷回收阶段常规数据监测曲线

Fig. 3 Phosphorus recovery stage conventional data monitoring curve

2.3 生物膜驯化过程中 SEM 分析

为了分析生物膜驯化过程中微生物群落结构变化情况,对 0、40、50 d 厌氧段活性污泥进行扫描

电子显微镜分析(SEM),如图 4 所示.在接种污泥中,存在少量球菌,在运行 40 d 后,污泥中出现大量椭圆形菌落结构菌体,出水磷浓度已低于 0.5

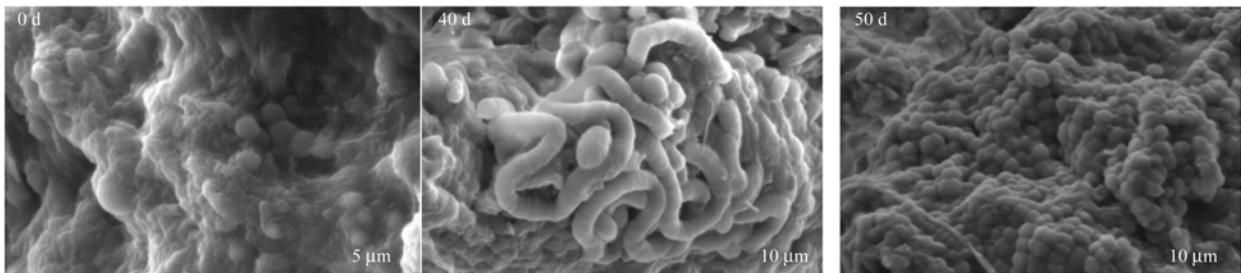


图 4 泥样 SEM 图片

Fig. 4 SEM images at different sampling times

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 反应器处于高效除磷状态. 在运行第 50 d 时, 聚落结构成熟, 均匀饱满, 外形规则, 轮廓清晰, 成球状. 文献指出潜在的 PAOs 主要为球菌、短杆菌、四联球菌^[15,16]. 结合反应器运行效率推测在驯化过程中聚磷菌得到很大程度的富集.

2.4 MiSeq 高通量测序结果分析

2.4.1 细菌丰度与多样性分析

在对 0、40、50 d 的 16S rDNA 测序后, 有效序列分别为 51953、60324 和 61379, 通过与数据库的比对划分, 共得到 1 400 个 OTUs, 各样品 OTUs 数目分别为样品 0 d 为 1 127, 40 d 为 1 200, 50 d 为 1 235. 样品 Venn 数据分析后发现, 3 个样品共有 OTUs 占总样品的 63.8%, 反应器在运行过程中对微生物进行了筛选, 一部分细菌得到保留, 不能适应环境的微生物被淘汰.

表 1 微生物多样性指标

Table 1 The α -diversity indices of the bacterial community

样本	OTU 数目	Shannon 指数	Simpson 指数	Chao1 指数	覆盖率/%
0 d	51953	7.66	0.98	1 164.69	100
40 d	60324	7.33	0.98	1 292.01	100
50 d	61379	7.30	0.98	1 308.28	100

2.4.2 细菌种群特性分析

对样品 OTUs 代表序列进行物种注释, 并将样品的有效序列划分到不同的分类水平. 对于不同污泥样品的主导菌群, 主要分析了各污泥样品在“门 (Phylum)”与“科 (family)”, 结果如图 5、6 所示.

本实验总共测到 29 个门, 相对丰度 >3%, 含量由大到小的门如图 5 所示, 为变形菌门

样品多样性指数如表 1 所示, Chao1、Shannon、Simpson 指数表明各隔室细菌群落和物种的丰富度. Shannon 指数反映了基于物种数量的群落种类多样性, 指数越大表明群落的复杂程度越高. Simpson 指数体现了优势物种占群落生物总量的比重, 该指数越大表明优势菌群生物量占总生物量比重越大, 反之则优势菌群生物量占总生物量比重越小^[17]. 在本实验中, 0~40 d, Shannon 指数由 7.66 下降至 7.33, Simpson 指数保持不变, Chao1 指数与 Shannon 趋势相反, 由 1 164.69 增长致 1 292.01. 40 d 后, Shannon 指数下降 0.4%, Chao1 指数上升 1.2%, 各种指数基本维持不变. 所以反应器中微生物种群多样性随着反应的进行逐渐减小, 运行 40 d 时, 反应器中的微生物种群结构基本进入稳定状态.

(Proteobacteria)、绿弯菌门 (Chloroflexi)、拟杆菌门 (Bacteroidetes)、放线菌门 (Actinobacteria)、Ignavibacteriae 门、硝化螺旋菌门 (Nitrospirae). 0~40 d, Proteobacteria 占比由起始的 47% 增长至 57%, 是各污泥样品中最丰富的门. Proteobacteria 类细菌细胞壁成分主要是脂多糖, 属于革兰氏阴性菌, 包含多种代谢种类, 在降解有机物的同时完成

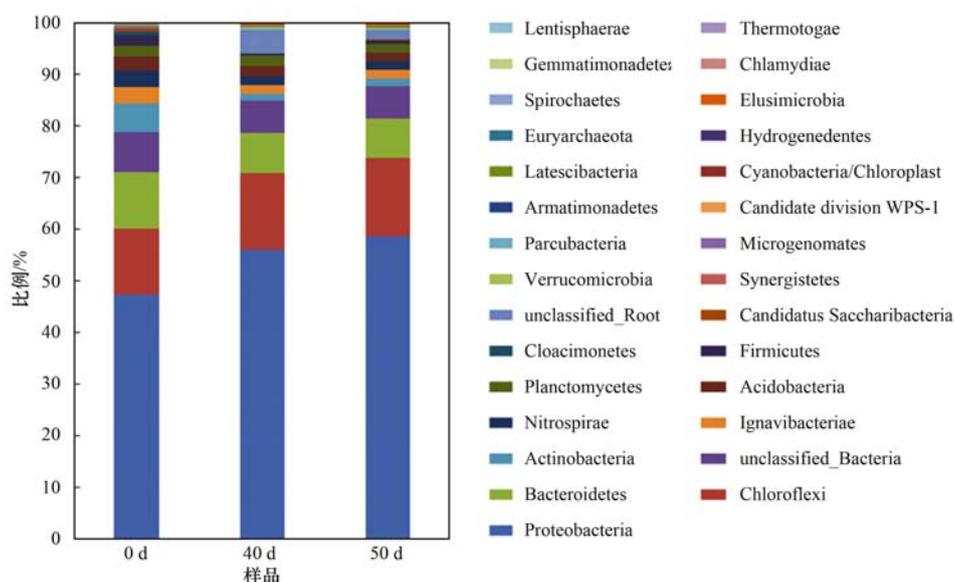


图 5 门级别的微生物分布

Fig. 5 Distribution of the bacterial community at the phylum level

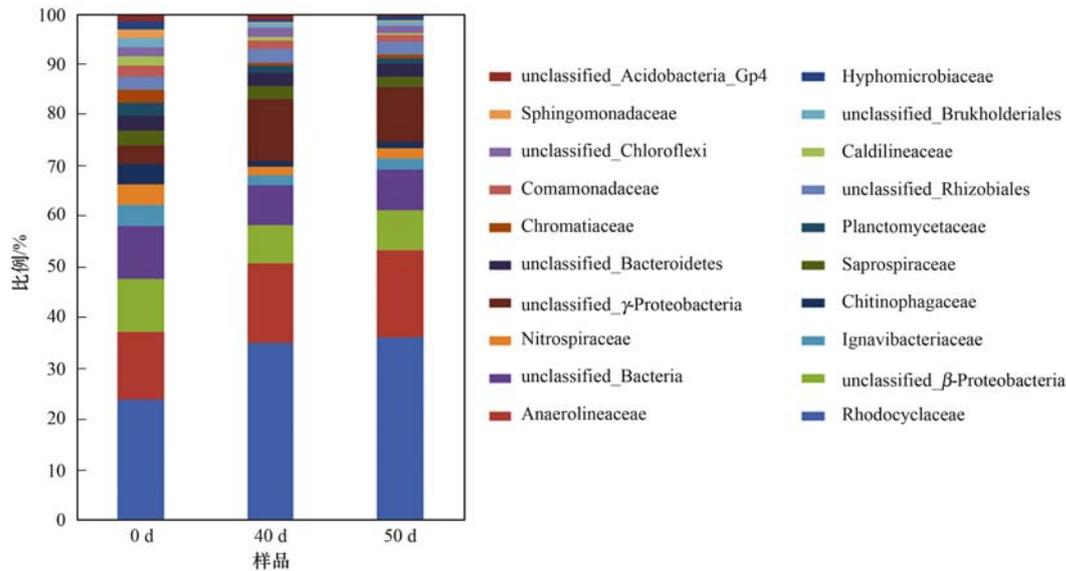


图6 科级别的微生物分布

Fig. 6 Distribution of the bacterial community at the family level

脱氮除磷的功能,是潜在的聚磷菌^[18],在运行过程中得到富集.前期研究证明 Proteobacteria 在除磷活性污泥系统中是主要的菌门^[19].Chloroflexi 由 12.8% 增长致 15.1%,Chloroflexi 大都在污泥的胶团絮状体内以絮体的形式存在,并为污泥的结构提供骨架支撑,该门类细菌是一类严格的厌氧微生物,能利用一系列短链脂肪酸产生氢气/二氧化碳/乙酸,具有良好的降解有机化合物的作用,可以为聚磷菌生长提供附着骨架.而拟杆菌门(Bacteroidetes)、放线菌门(Actinobacteria)、Ignavibacteriae 门、硝化螺旋菌门(Nitrospirae)分别下降了30%、76%、43%、45.4%.由于其不能适应反应器运行环境,数量逐渐减少.在40~50d,Proteobacteria、Ignavibacteriae、Nitrospirae 分别增长2.4%、0.98%、2.5%,而 Bacteroidetes、Chloroflexi、Actinobacteria 分别下降3.4%、0.7%、1.9%.40d后反应器种微生物虽然出现轻微的波动,但已基本稳定.

为进一步阐明反应器在运行过程中优势功能菌以及细菌群落的演化,在科的水平上对相对丰度大于3%的微生物进行分析,如图6所示.本实验总共检测到182个科,由大到小排序为红环菌科(Rhodocyclaceae)、厌氧绳菌科(Anaerolineaceae)、未纯培养的 β -变形菌目(unclassified_ β -Proteobacteria)、Ignavibacteriaceae、硝化螺旋菌科(Nitrospiraceae).在0~40d,厌氧绳菌科(Anaerolineaceae)由9.8%增长至12.9%,增长31.6%.而未纯培养的 β -变形菌目(unclassified_ β -

Proteobacteria)、Ignavibacteriaceae、硝化螺旋菌科(Nitrospiraceae)分别减少20.25%、50.33%、54.69%,由于其不能适应环境,所以在聚磷生物膜驯化过程中被淘汰.红环菌科(Rhodocyclaceae)含量最高,由17.9%增长至28.34%,增长58.32%.Bond等发现^[20],红环菌在高效除磷系统中含量较高,而在低效除磷系统中含量较少,推测红环菌可能是造成两系统除磷功能差异的主要原因.Zilles等也指出^[21],红环菌是生物强化除磷系统中的优势聚磷菌,发挥着主要除磷作用.根据该菌所占比例的变化以及系统的除磷效果推测,Rhodocyclaceae是系统中的优势聚磷菌.在40~50d,红环菌科增长3.2%,厌氧绳菌科增长6%,其他菌科均出现不同程度的下降,在反应器运行过程中聚磷菌一直被筛选富集.

在EBPR(enhanced biological P removal)工艺中,除磷微生物的丰度影响系统的运行效果.公认的PAOs包括Acinetobacter^[22,23]、Pseudomonas^[24,25]、Rhodocyclaceae^[24,25],它们能在厌氧条件下将挥发性脂肪酸(VFA)等碳源储存为聚羟基脂肪酸(PHAs)的同时释放磷,而在好氧条件下以PHAs为能量来源实现微生物生长、糖原合成以及磷的吸收^[26].在本实验中,通过好氧/厌氧交替运行,进水条件为COD 200 mg·L⁻¹,PO₄³⁻-P 5 mg·L⁻¹,温度30℃,pH为7.5,聚磷菌Pseudomonas由0.04%增长至0.34%,Acinetobacter由0.06%下降至0.03%,而Rhodocyclaceae由17.9%上升至28.9%.在生物膜法回收磷工艺中,Tian等^[9]在厌

氧/好氧交替生物滤池以高磷溶液进水,在周期性碳源扩增进行磷回收,测序发现 *Pseudomonas* 是反应器中的优势聚磷菌,占 98.03%。Kodera 等^[10]在好氧/厌氧交替的生物滤池进行磷回收实验,以低磷废水进水, FISH 研究证明聚磷菌(主要为假单胞菌和红环菌)占 30%。本实验聚磷菌含量与 Kodera 等^[10]的实验结果相近,但与 Tian 等^[9]的实验结果相差较大。生物膜系统中微生物的群落组成结构与进水水质有关^[27],不同的碳源浓度和磷浓度会影响聚磷菌的筛选,较高的碳源浓度刺激会促进某种聚磷菌的高效富集^[9],推测本实验以模拟生活废水为进水是导致富集聚磷菌浓度低于 Tian 等^[9]的实验结果的原因。

3 结论

(1) 挂膜成功后, COD 出水 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,出水磷浓度接近于零,并在该水平上稳定运行 40 d。随后进行磷溶液富集,提高进水磷浓度和进行碳源刺激都可以提高回收液的磷浓度,提高进水磷浓度,磷酸盐浓度增长至 $55 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;进行碳源刺激时,磷浓度提高至 $82 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,随着进水碳源的降低,最终得到磷浓度为 $58 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的富磷溶液。

(2) 生物膜驯化过程中,物种丰度增高,细菌多样性略微下降。不同碳源污泥样品的“门”与“科”级别上分别以 Proteobacteria、Rhodocyclaceae 占主导。Proteobacteria 由 47% 增长至 58%, Rhodocyclaceae 由 17.9% 上升至 28.9%, Rhodocyclaceae 是反应器的优势聚磷菌。

参考文献:

- [1] Acelas N Y, López D P, Brilman D W F, *et al.* Supercritical water gasification of sewage sludge: gas production and phosphorus recovery[J]. *Bioresource Technology*, 2014, **174**: 167-175.
- [2] Hutnik N, Kozik A, Mazieniczuk A, *et al.* Phosphates (V) recovery from phosphorus mineral fertilizers industry wastewater by continuous struvite reaction crystallization process[J]. *Water Research*, 2013, **47**(11): 3635-3643.
- [3] Qiu G L, Ting Y P. Direct phosphorus recovery from municipal wastewater via osmotic membrane bioreactor (OMBR) for wastewater treatment[J]. *Bioresource Technology*, 2014, **170**: 221-229.
- [4] Zou H M, Lu X W. An innovative continuous flow BNR-IC process for nutrients removal and phosphorus recovery from synthetic and real domestic wastewater [J]. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 2016, **24**(2): 116-123.
- [5] Desmidt E, Ghyselbrecht K, Zhang Y, *et al.* Global phosphorus scarcity and full-scale p-recovery techniques: a review [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2015, **45**(4): 336-384.
- [6] Bradford-Hartke Z, Lane J, Lant P, *et al.* Environmental benefits and burdens of phosphorus recovery from municipal wastewater[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(14): 8611-8622.
- [7] Falkentoft C M, Müller E, Arnz P, *et al.* Population changes in a biofilm reactor for phosphorus removal as evidenced by the use of FISH[J]. *Water Research*, 2002, **36**(2): 491-500.
- [8] Chiou R J, Yang Y R. An evaluation of the phosphorus storage capacity of an anaerobic/aerobic sequential batch biofilm reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(10): 4408-4413.
- [9] Tian Q, Ong S K, Xie X H, *et al.* Enhanced phosphorus recovery and biofilm microbial community changes in an alternating anaerobic/aerobic biofilter[J]. *Chemosphere*, 2016, **144**: 1797-1806.
- [10] Kodera H, Hatamoto M, Abe K, *et al.* Phosphate recovery as concentrated solution from treated wastewater by a PAO-enriched biofilm reactor [J]. *Water Research*, 2013, **47**(6): 2025-2032.
- [11] 张成, 秦华星, 王康伟, 等. 补充碳源对交替式厌氧/好氧生物滤池生物蓄磷/回收磷的影响[J]. *环境工程学报*, 2015, **9**(8): 3602-3608.
Zhang C, Qin H X, Wang K W, *et al.* Effects of carbon-source supplement patterns on phosphorus bio-accumulation and harvesting from an alternating anaerobic/aerobic biofilter [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, **9**(8): 3602-3608.
- [12] 程晓玲, 郑俊, 程晓虎. 交替曝气两级生物滤池除磷工艺挂膜启动研究[J]. *新技术新工艺*, 2009, (11): 77-80.
Cheng X L, Zheng J, Cheng X H. Research on film formation and start-up of phosphorus removal in two-stage biological filter by alternating aeration[J]. *New Technology & New Process*, 2009, (11): 77-80.
- [13] 张顺, 田晴, 汤曼琳, 等. 磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响[J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 979-986.
Zhang S, Tian Q, Tang M L, *et al.* Effect of Phosphorus recovery on phosphorous bioaccumulation/harvesting in an alternating anaerobic/aerobic biofilter system[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(3): 979-986.
- [14] Wang B Z, Li J, Wang L, *et al.* Mechanism of phosphorus removal by SBR submerged biofilm system[J]. *Water Research*, 1998, **32**(9): 2633-2638.
- [15] 邢德峰, 任南琪. 应用 DGGE 研究微生物群落时的常见问题[J]. *微生物学报*, 2006, **46**(2): 331-335.
Xing D F, Ren N Q. Common problems in the analyses of microbial community by denaturing gradient gel electrophoresis (DGGE)[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2006, **46**(2): 331-335.
- [16] Kim J M, Lee H J, Lee D S, *et al.* Identification of a novel subgroup of uncultured gammaproteobacterial glycogen-accumulating organisms in enhanced biological phosphorus removal sludge[J]. *Microbiology*, 2011, **157**(8): 2287-2296.
- [17] 刁晓君, 李一葳, 王曙光. 水华生消过程对巢湖沉积物微生物群落结构的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 107-113.
Diao X J, Li Y W, Wang S G. Effects of outbreak and extinction of algal blooms on the microbial community structure in sediments

- of Chaohu lake[J]. Environmental Science, 2015, **36**(1): 107-113.
- [18] Nguyen H T T, Le V Q, Hansen A A, *et al.* High diversity and abundance of putative polyphosphate-accumulating *Tetrasphaera*-related bacteria in activated sludge systems [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2011, **76**(2): 256-267.
- [19] 夏雪, 邵明非, 吕小梅, 等. 不同碳源驯化除磷污泥的除磷效果及菌群结构分析[J]. 环境科学研究, 2014, **27**(8): 936-942.
- Xia X, Shao M F, Lyu X M, *et al.* Phosphorus removal performance and bacterial community structure of denitrifying phosphorus removal sludge operated with different carbon sources [J]. Research of Environmental Sciences, 2014, **27**(8): 936-942.
- [20] Bond P L, Keller J, Blackall L L. Characterisation of enhanced biological phosphorus removal activated sludges with dissimilar phosphorus removal performances [J]. Water Science and Technology, 1998, **37**(4-5): 567-571.
- [21] Zilles J L, Hung C H, Noguera D R. Presence of Rhodocyclus in a full-scale wastewater treatment plant and their participation in enhanced biological phosphorus removal[J]. Water Science and Technology, 2002, **46**(1-2): 123-128.
- [22] Gebremariam S Y, Beutel M W, Christian D, *et al.* Research advances and challenges in the microbiology of enhanced biological phosphorus removal-a critical review [J]. Water Environment Research, 2011, **83**(3): 195-219.
- [23] Rittmann B E, McCarty P L. Environmental biotechnology: principles and applications[M]. Boston: McGraw-Hill, 2002.
- [24] Lin C K, Katayama Y, Hosomi M, *et al.* The characteristics of the bacterial community structure and population dynamics for phosphorus removal in SBR activated sludge processes[J]. Water Research, 2003, **37**(12): 2944-2952.
- [25] Nguyen H T T, Nielsen J L, Nielsen P H. ‘*Candidatus Halomonas phosphatis*’, a novel polyphosphate-accumulating organism in full-scale enhanced biological phosphorus removal plants[J]. Environmental Microbiology, 2012, **14**(10): 2826-2837.
- [26] Zhou Y, Pijuan M, Zeng R J, *et al.* Involvement of the TCA cycle in the anaerobic metabolism of polyphosphate accumulating organisms (PAOs)[J]. Water Research, 2009, **43**(5): 1330-1340.
- [27] Cao Y S, Alaerts G J. Influence of reactor type and shear stress on aerobic biofilm morphology, population and kinetics [J]. Water Research, 1995, **29**(1): 107-118.



CONTENTS

Diurnal Variation of SOA Formation Potential from Ambient Air at an Urban Site in Beijing	LIU Jun, CHU Bi-wu, HE Hong (2505)
Characteristics of Key Size Spectrum of PM _{2.5} Affecting Winter Haze Pollution in Taiyuan	YANG Su-ying, YU Xin-yang, ZHAO Xiu-yong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Panjin	ZHANG Lei, JI Ya-qin, WANG Shi-bao, <i>et al.</i> (2521)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in the Rainy Season of Guangzhou City	GU Ying-gang, YU Xiao-fang, YANG Wen-da, <i>et al.</i> (2528)
Emission Characteristics of Dehydrated Sugar and Acephenanthrylene in Particles from Tropical Forest Burning	JIN Cheng-miao, CUI Min, HAN Yong, <i>et al.</i> (2538)
Construction and Application of Vertical Diffusion Index for Analyzing Weather During Pollution Events in Tianjin	CAI Zi-ying, HAN Su-jin, ZHANG Min, <i>et al.</i> (2548)
Comparison Between Atmospheric Wet-only and Bulk Nitrogen Depositions at Two Sites in Subtropical China	ZHU Xiao, WANG Jie-fei, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2557)
Emission Reduction Benefits When Eliminating Yellow-label Vehicles in the Jing-jin-ji Region	LU Ya-ling, ZHOU Jia, CHENG Xi, <i>et al.</i> (2566)
Health Assessment of the Stream Ecosystem in the North Canal River Basin, Beijing, China	GU Xiao-yun, XU Zong-xue, LIU Lin-fei, <i>et al.</i> (2576)
Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Phthalic Acid Esters During High Water Level Periods in the Wuhan Section of the Yangtze River, China	DONG Lei, TANG Xian-qiang, LIN Li, <i>et al.</i> (2588)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Downstream Areas of the Aojiang River, Fujian Province	ZHANG Dan-dan, GUO Ya-ping, REN Hong-yun, <i>et al.</i> (2600)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of the Estuary of the Tributaries in the Three Gorges Reservoir, SW China	FANG Zhi-qing, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2607)
Assessment of Physico-chemical Properties and Phosphorus Fraction Distribution Characteristics in Sediments after Impounding of the Three Gorges Reservoir to 175 m	PAN Chan-juan, LI Rui, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2615)
Source of Nitrate in Surface Water and Shallow Groundwater Around Baiyangdian Lake Area Based on Hydrochemical and Stable Isotopes	KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, DING fei, <i>et al.</i> (2624)
Thermal Stratification and Its Impacts on Water Quality in Shahe Reservoir, Liyang, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (2632)
Spatial and Temporal Variation Characteristics of Drip Water Hydrogeochemistry in the Xueyu Cave of Chongqing and Its Implications for Environmental Research	ZENG Ze, JIANG Yong-jun, LÜ Xian-fu, <i>et al.</i> (2641)
Distinguishing the Compositions and Sources of the Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Typical Karst River During the Dry Season; A Case Study in Bitan River, Jinfo Mountain	LIU Yue, HE Qiu-fang, LIU Ning-kun, <i>et al.</i> (2651)
Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation at Different Altitudes in the Tuolai River Basin	LI Yong-ge, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i> (2661)
Spatial-Temporal Variations of CO ₂ and CH ₄ Flux Through a Water-air Interface Under the Effect of Primary Productivity in Wulixia Reservoir	PENG Wen-jie, LI Qiang, SONG Ang, <i>et al.</i> (2673)
Spatiotemporal Succession Characteristics of Algal Functional Groups and Its Impact Factors for a Typical Channel-Type Reservoir in a Southwest Mountainous Area	ZHANG Yao-wen, LI Hong, LI Jia, <i>et al.</i> (2680)
Seasonal Succession of Phytoplankton Functional Groups and Their Driving Factors in the Siminghu Reservoir	ZHENG Cheng, LU Kai-hong, XU Zhen, <i>et al.</i> (2688)
Effects of Nutrient Addition on the Growth and Competition of Bloom Forming Cyanobacterium <i>Chrysochloris ovalisporum</i> ; An In-situ Experiment	WANG Meng-meng, ZHANG Wei, ZHANG Jun-yi, <i>et al.</i> (2698)
Purification Effect of Submerged Macrophyte System with Different Plants Combinations and C/N Ratios	LIU Miao, CHEN Kai-ning (2706)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Concentration Dynamics in Natural Ditches Under an Irrigation-Drainage Unit in the Jiangnan Plain	HUA Ling-ling, ZHANG Fu-lin, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (2715)
Distribution and Treatment of Antibiotics in Typical WWTPs in Small Towns in China	CHAI Yu-feng, ZHANG Yu-xiu, CHEN Mei-xue, <i>et al.</i> (2724)
Effects and Mechanism of the Combination of Ozone-PAC as a Pretreatment for the Reduction of Membrane Fouling	DONG Bing-zhi, GAO Hao-yang, HU Meng-liu (2732)
Start-up and Process Characteristics of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) in a Pilot-scale Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR)	YU De-shuang, TANG Jia-jia, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (2740)
Phosphate Removal on Zirconium Alginate/Poly(<i>N</i> -isopropyl acrylamide) Hydrogel Beads with a Semi-interpenetrating Network	ZENG Xue-yang, LUO Hua-yong, ZHANG Yao-kun, <i>et al.</i> (2748)
Shortcut Nitrification Rapid Start and Stability of Corn Starch Wastewater	LONG Bei-sheng, LIU Xun-lei, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (2756)
Nitrifying Bacteria Culture in Entrapment Immobilization	YANG Hong, HU Yin-long (2763)
Performance of the Removal of Nitrogen During Anaerobic Ammonia Oxidation Using Different Operational Strategies	AN Fang-jiao, PENG Yong-zhen, DONG Zhi-long, <i>et al.</i> (2770)
Transformation of Protein in Sludge During High Solids Anaerobic Digestion	ZHAN Yu, SHI Wan-sheng, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (2778)
Changes in Heavy Metal Speciation and Release Behavior Before and After Sludge Composting Under a Phosphate-rich Atmosphere	LI Yu, FANG Wen, QI Guang-xia, <i>et al.</i> (2786)
Effect of Denitrification and Phosphorus Removal Microorganisms in Activated Sludge Bulking Caused by Filamentous Bacteria	GAO Chen-chen, YOU Jia, CHEN Yi, <i>et al.</i> (2794)
Microbial Population Dynamics During Domestication and Cultivation of Biofilm to Remove and Enrich Phosphate	MENG Xuan, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Elevated Tetracycline Concentrations on Aerobic Composting of Human Feces: Composting Behavior and Microbial Community Succession	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian, <i>et al.</i> (2810)
Effect of Long-term Organic Amendments on Nitric Oxide Emissions from the Summer Maize-Winter Wheat Cropping System in Guanzhong Plain	YUAN Meng-xuan, WANG Jin-feng, TAN Yue-hui, <i>et al.</i> (2819)
Effects of Mushroom Residue Application Rates on Net Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, ZHOU Peng, <i>et al.</i> (2827)
Estimation of Winter Wheat Photosynthesized Carbon Distribution and Allocation Belowground via ¹³ C Pulse-labeling	SUN Zhao-an, CHEN Qing, HAN Xiao, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Nitrogen Pathways in a Karst Region of Southwest China	YANG Yi, OUYANG Yun-dong, CHEN Hao, <i>et al.</i> (2845)
Identifying the Origins and Spatial Distributions of Heavy Metals in the Soils of the Jiangsu Coast	LÜ Jian-shu, HE Hua-chun (2853)
Source Identification and Spatial Distribution of Heavy Metals in Soils in Typical Areas Around the Lower Yellow River	YU Yuan-he, LÜ Jian-shu, WANG Ya-meng (2865)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in Lin'an City and Its Potential Risk Evaluation	ZHENG Jing-zhi, WANG Chu-dong, WANG Shi-han, <i>et al.</i> (2875)
Principal Component Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils around a Pb-Zn Mine in Southwestern China	ZHOU Yan, CHEN Qiang, DENG Shao-po, <i>et al.</i> (2884)
Spatial Variation of Heavy Metals in Soils and Its Ecological Risk Evaluation in a Typical <i>Carya cathayensis</i> Production Area	ZHANG Hong-ju, ZHAO Ke-li, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (2893)
Influence of Biochar Application on Growth and Antioxidative Responses of Macrophytes in Subsurface Flow Constructed Wetlands	HUANG Lei, CHEN Yu-cheng, ZHAO Ya-qi, <i>et al.</i> (2904)
Effect of Iron on the Release of Arsenic in Flooded Paddy Soils	WANG Xin, ZHONG Song-xiong, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2911)
Concentrations and Health Risk Assessments of Heavy Metal Contents in Soil and Rice of Mine Contaminated Areas	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (2919)
Effect of Calcium Silicate-biological Humus Fertilizer Composite on Uptake of Cd by Shallots from Contaminated Agricultural Soil	LIU De-ling, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2927)
Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Greenhouse Soil and Vegetables in Siping City, Jilin Province	LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, ZENG Xi-hai, <i>et al.</i> (2936)
Effect of Foliar Zinc Application on Bioaccessibility of Cadmium and Zinc in Pakchoi	WANG Lin, GU Peng-lei, LI Ran, <i>et al.</i> (2944)
Mercury Distribution of Benthonic Animals and Response to Mercury in Sediments in Caohai Wetland, Guizhou Province	XU Yi-yuan, ZENG Ling-xia, HE Tian-rong, <i>et al.</i> (2953)
Discussion of Emissions and Health Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from the Retreading Process of Waste Tires	FU Jian-ping, ZHAO Bo, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (2963)
Spatiotemporal Dynamics of CO ₂ Emissions in Chongqing: An Empirical Analysis at the County Level	SUN Xiu-feng, SHI Kai-fang, WU Jian-ping (2971)
Impact of Size on Environmental Behavior of Metal Oxide Nanoparticles	YAN Yu-peng, TANG Ya-dong, WAN Biao, <i>et al.</i> (2982)
Fate and Toxicity of UV Filters in Marine Environments	ZHU Xiao-shan, HUANG Jing-ying, LÜ Xiao-hui, <i>et al.</i> (2991)