

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.7
第40卷 第7期

目次

《大气污染防治行动计划》实施的环境健康效果评估 武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇, 冯涛, 蔡泽林 (2961)

基于达标约束的南京市环境空气质量情景模拟 谢放尖, 史之浩, 李婧祎, 郑新梅, 胡建林, 刘春蕾, 杨峰 (2967)

郑州市 PM_{2.5} 中水溶性离子特征及来源分析 杨留明, 王申博, 郝祺, 韩士杰, 李晨, 赵庆炎, 燕启社, 张瑞芹 (2977)

能见度与 PM_{2.5} 浓度关系及其分布特征 王继康, 张恒德, 桂海林, 饶晓琴, 张碧辉 (2985)

基于扩散模式反演的橡胶轮胎制造行业 VOCs 排放特征 白红祥, 魏巍, 王雅婷, 任云婷, 臧佳欣, 程水源 (2994)

太原市环境空气中挥发性芳香烃碳同位素组成及来源 李颖慧, 闫雨龙, 李志生, 郝爱胜, 李如梅, 杨帆, 彭林 (3001)

办公楼聚集区空气中 PBDEs 谱分布与污染特征 王琳, 邓雅佳, 廖晓勇, 曹红英, 焦春春 (3008)

南北水调东线中游枢纽湖泊有色可溶性有机物来源组成特征 张柳青, 彭凯, 周蕾, 石玉, 李元鹏, 周永强, 龚志军, 张运林, 杨艳 (3018)

黄土丘陵沟壑区小流域不同水体氢氧同位素特征 张荷惠子, 于坤霞, 李占斌, 李鹏, 赵宾华, 柯浩成, 蒋凯鑫 (3030)

基于碳氮同位素的澜沧江水库 TOC 来源差异性分析 王从锋, 胡子龙, 杨正健, 丹勇, 赵萍, 郝文超, 聂小芬, 聂睿, 徐刘得, 刘德富 (3039)

李家河水库污染物来源及水体分层对水质的影响 徐进, 黄廷林, 李凯, 杨尚业, 温成成, 林子深, 李衍庆, 刘雪晴 (3049)

水库淹没带土壤有机氯农药分布特征及风险评价 王霞, 张青琢, 赵高峰, 王晓燕 (3058)

银川市湿地表层水中多环芳烃的分布、来源及生态风险评价 田大年, 党丽慧, 丁润梅, 蔡倩, 张鹏举, 汪岭, 杨慧芳 (3068)

人类活动影响下的垂直气候带岩溶泉地球化学特征对比: 以重庆金佛山水房泉、碧潭泉为例 谢国文, 杨平恒, 盛婷, 邓书金, 洪爱花 (3078)

渝江冲洪积扇地下水化学特征及控制因素分析 唐金平, 张强, 胡谦, 张宇, 聂保伟 (3089)

三峡库区蓄水期和非蓄水期附石藻类群落变化及其影响因素分析 付君珂, 刘黎, 贺新宇, 张红波, 董聪聪, 杨燕君, 施军琼, 吴忠兴 (3099)

降雨对香溪河库湾主要藻种原位生长的影响 翁传松, 刘德富, 张佳磊, 龚川, 沈旭舟 (3108)

绿狐尾藻分解及其氮磷释放特征 童雄, 罗沛, 刘锋, 黄敏, 陈哲, 肖润林, 吴金水 (3118)

微藻固定化条件优化及其污水氨氮去除潜力分析 刘祥, 王婧瑶, 吴娟娟, 鹏飞, 王凯军 (3126)

钛酸盐纳米管对水中氨氮的吸附特性 张政, 冯长生, 张晓瑞, 郑建奎, 蒋彩云, 李攀杰, 王玉萍 (3135)

基于缺陷重构的类芬顿光催化剂在降解染料废水中的应用 唐清文, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 李海翔 (3146)

N 原子杂化石墨烯高效活化过一硫酸盐降解 RBk5 染料废水 于永波, 黄湾, 董正玉, 吴丽颖, 张倩, 洪俊明 (3154)

Cu²⁺ 对以 NO₂⁻ 为电子受体反硝化过程的影响 买文可, 彭永臻, 吉建涛 (3162)

CANON 中试反应器启动及性能优化 孙庆花, 吴迪, 周家中, 郑志佳 (3169)

好氧段碳源浓度对同步去除和富集磷酸盐生物膜的影响 徐林建, 潘杨, 章豪, 冯鑫, 魏攀龙, 尤星怡 (3179)

有机物特性对 AAO 系统污泥沉降性能的影响 刘小博, 袁林江, 陈希, 薛欢婷 (3186)

不同污泥浓度下缺氧 FNA 对硝化菌活性的影响 吕心涛, 周桐, 田夏迪, 谷鹏超, 杨岸明, 王伟佳, 张树军 (3195)

ANAMMOX 菌铁自养反硝化工艺的稳定性 张文静, 黄勇, 毕贞, 胡羽婷, 董石语 (3201)

在线 NaClO 反洗对倒置 A²O-MBR 系统微生物群落的影响 王旭东, 高森, 王莹莹, 杨永哲, 刚家斌, 符国力, 王磊 (3208)

基于有机物释放和经济性的污泥预处理方法评价 袁悦, 谭学军, 郑舍予 (3216)

北京市清水与再生水协同利用优化模型 张田媛, 谭倩, 王淑萍 (3223)

N-亚硝胺在不同处理工艺污水处理厂中的分布及其去除 柳王荣, 赵建亮, 杨愿愿, 姚理, 刘有胜, 应光国 (3233)

北京市生活污水中曲马多和芬太尼的赋存 周子雷, 杜鹏, 白雅, 韩胜, 黄红梅, 徐泽琼, 李喜青 (3242)

贵阳市污水处理厂中典型抗生素的污染水平及生态风险 杨钊, 李江, 张圣虎, 向福亮, 唐涛涛, 杨娅男 (3249)

紫色土丘陵区畜禽养殖场土壤中抗生素抗性基因分布特征 程建华, 唐翔宇, 刘琛 (3257)

四环素对污泥蚯蚓粪中微生物种群和抗性基因的影响 陈景阳, 夏慧, 黄魁, 吴颖 (3263)

热水解污泥厌氧消化过程中肠球菌抗生素抗性基因与毒力基因的转归 李慧莉, 裴媛玫, 李姗, 何芙蓉, 杨月婷, 魏源送, 佟娟 (3270)

鸡粪与中药渣共堆肥对抗生素抗性基因的影响 武晋萍, 陈建文, 刘勇, 张红, 李君剑 (3276)

宁武亚高山湖泊细菌群落的时空格局及驱动机制 王雪, 刘晋仙, 柴宝峰, 罗正明, 赵鹏宇, 暴家兵 (3285)

石家庄市春季景观水体 nirS 型反硝化细菌群落特征分析 张艺冉, 李再兴, 孙悦, 霍然, 孟文茹, 王凌霄, 申邵恒, 杨子程, 周石磊 (3295)

磷差异性调控水稻根际 nirK/nirS 型反硝化菌组成与丰度 湛钰, 高丹丹, 盛荣, 魏文学, 秦红灵, 张文钊, 侯海军, 汤亚芳 (3304)

会仙岩溶湿地、稻田与旱地土壤细菌群落结构特征比较 贾远航, 靳振江, 袁武, 程跃扬, 邱江梅, 梁锦桃, 潘复静, 刘德深 (3313)

湘中典型稻田系统 Cd 平衡分析 蒋凯, 邓潇, 周航, 龙坚, 李欣阳, 董霞, 王树兵, 刘文辉, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (3324)

改良剂对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响 李义纯, 王艳红, 唐明灯, 巫彬芳, 李林峰, 艾绍英, 凌志祥 (3331)

重金属固定植物促生细菌的筛选及其阻控小麦富集重金属效应 韩辉, 王晓宇, 蔡红, 姚伦广, 蔡倩迪, 王逸雪, 陈兆进 (3339)

不同品种辣椒镉亚细胞分布和化学形态特征差异 彭秋, 李桃, 徐卫红, 焦璐琛, 邓继宝 (3347)

添加磷对水稻-油菜轮作土壤 N₂O 排放影响 孙正, 苏荣琳, 徐鹏, 吴宏涛, 胡金丽, 赵劲松, 胡荣桂 (3355)

渭北旱原土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响 刘杰, 马艳婷, 王宪玲, Sompouviset Thongsouk, 李利敏, 秦亚旭, 赵志远, 郑伟, 翟丙年 (3361)

不同土地利用类型的土壤中多环芳烃的纵向迁移特征 鲁垠涛, 向鑫鑫, 张士超, 刘明丽, 王静, 李爽, 姚宏, 孙绍斌 (3369)

西湖景区土壤中邻苯二甲酸酯污染水平、来源分析和空间分布特征 廖健, 邓超, 陈怡, 周文钊, 林春绵, 张辉 (3378)

生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响 李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 张久成, 陈树兰, 王慧玲, 张妍, 负方悦, 杨林, 董胜虎 (3388)

《环境科学》征订启事(3194) 《环境科学》征稿简则(3222) 信息(3256, 3284, 3323)

好氧段碳源浓度对同步去除和富集磷酸盐生物膜的影响

徐林建^{1,2}, 潘杨^{1,2,3*}, 章豪^{1,2}, 冯鑫^{1,2}, 魏攀龙^{1,2}, 尤星怡^{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: 利用聚磷菌以循环交替 O/A 模式运行, 对生活污水处理厂的主流工艺中实现磷酸盐的同步去除和富集, 探究了好氧段碳源浓度对聚磷生物膜去除和富集磷酸盐性能以及生物膜中微生物种群结构的影响. 结果表明, 好氧 COD 质量浓度从 200 mg·L⁻¹ 降低到 0 mg·L⁻¹, 吸磷速率提升 1.29 倍, 出水磷质量浓度稳定在 0.5 mg·L⁻¹ 以下; 释磷速率提升 3.56 倍, 富集液磷酸盐质量浓度从 27.125 mg·L⁻¹ 升高到 55.91 mg·L⁻¹. 微生物群落变化中, 鉴定为聚磷菌的变形菌门(Proteobacteria)的含量增加约 2 倍, 红环菌科(Rhodocyclaceae)和厌氧绳菌科(Anaerolineaceae)的富集效果分别提高了 2.28 和 5 倍. 降低好氧段碳源浓度, 有利于聚磷菌的筛选和富集, 强化了好氧段磷酸盐的去除以及厌氧段磷酸盐的释放, 获得了更高的磷酸盐富集液, 并且为以资源回收为目的的未来城市污水处理厂提供降低好氧段碳源需求的理论基础.

关键词: 好氧段碳源; 聚磷生物膜; 去除和富集; 微生物群落

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)07-3179-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.201811020

Effects of Aerobic Carbon Sources on Biofilm with Simultaneous Phosphate Removal and Enrichment

XU Lin-jian^{1,2}, PAN Yang^{1,2,3*}, ZHANG Hao^{1,2}, FENG Xin^{1,2}, WEI Pan-long^{1,2}, YOU Xing-yi^{1,2}

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

Abstract: In a cyclic alternating O/A operation mode, phosphorus accumulating organisms (PAOs) can undertake phosphate removal and enrichment as the main process in wastewater treatment plants. The effects of the concentration of carbon sources during the aerobic stage on phosphate removal and enrichment performance of PAO biofilms, and the microbial population structure in the biofilms, were investigated. The results showed that the aerobic COD concentration decreased from 200 mg·L⁻¹ to 0 mg·L⁻¹, the phosphorus uptake rate improved by 1.29 times, the phosphorus concentration in effluent stabilized below 0.5 mg·L⁻¹, the phosphorus release rate increased by 3.56 times, and the phosphate concentration in the circulating solution increased from 27.125 mg·L⁻¹ to 55.91 mg·L⁻¹. With respect to the change in microbial communities, the identification showed that the abundance of Proteobacteria increased by approximately two times, and the enrichment effects of Rhodocyclaceae and Anaerolineaceae increased by 2.28 and 5 times, respectively. Reducing the concentration of the carbon source in the aerobic section was beneficial to the screening and enrichment of PAOs, strengthening the removal of phosphate in the aerobic section and the release of phosphate in the anaerobic section. This resulted in an enriched phosphate solution. These observations provide a theoretical basis for future urban sewage treatment plants seeking to reduce their carbon demand.

Key words: carbon source in aerobic; phosphorus accumulating organisms (PAOs) biofilm; removal and enrichment; microbial community

人口的增长和可持续社会的发展, 迫使城市污水处理厂向能源循环型转变^[1], 这意味着未来污水处理厂将对有机物及其他资源进行回收^[2], 即需要在主流工艺中, 直接对含磷和含碳量低的生活污水进行磷回收. 而现有的磷回收技术主要是基于以除磷为主要目的的 EBPR (enhanced biological phosphorus remove), 从主流工艺的厌氧段末端上清液、侧流工艺中的厌氧消化池上清液中, 对含高浓度磷酸盐的废水进行磷回收. 但只有进水中含有足够的有机物, 尤其是短链可挥发性脂肪酸(volatile fatty acids, VFAs)时, 才能获得良好的除磷能力^[3, 4], 故有机物的含量将成为其重要限制条件.

而生物膜法一定程度上减少了碳源的投加, 还避免了大量剩余污泥的产生^[5], 可结合 SBR 工艺进一步稳定并强化微生物的富集和活化^[6, 7]. Kodera 等^[8]即在 200 mg·L⁻¹ COD 下 90 d 获得 125 mg·L⁻¹ 富磷溶液, 但好氧出水上升至 2.5 mg·L⁻¹; 而 Tian 等^[9]则消耗 800 ~ 1 600 mg·L⁻¹ 的 COD 获得 82 mg·L⁻¹ 的富磷溶液.

此外, 基于传统除磷理论, 聚磷菌在厌氧状态

收稿日期: 2018-11-02; 修订日期: 2019-02-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778390); 江苏省自然科学基金项目(BK20171219)

作者简介: 徐林建(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: 496860481@qq.com

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

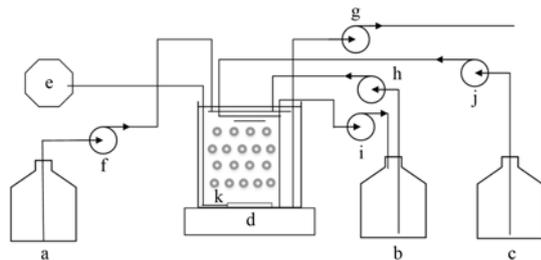
下吸收有机物, 转化为内碳源 PHB, 继而在好氧状态下分解 PHB, 以提供能量吸收磷酸盐和自身的生理活动, 其中并未界定好氧段碳源对其的影响. 又有研究认为, PAOs 在好氧段存在乙酸钠时仍然可以进行释磷, 部分乙酸钠被利用并合成 PHB^[10], 唐旭光等^[11]发现在 VFAs 足够时, PAOs 在好氧段合成 PHB 的速率明显高于厌氧段. 而实际污水处理中, 尤其是在未来资源回收的前提下, 要保证在好氧出水达标, 其进入好氧段的有机物对 PAOs 的影响并不明确, 所以好氧段碳源浓度对循环交替运行下的聚磷生物膜的影响有待研究. 本试验中, 通过改变好氧段碳源浓度, 对循环交替 O/A 运行模式下的磷溶液去除和富集情况进行研究, 探究了其在同步去除与富集磷的生物膜反应器中进行吸磷和释磷规律, 以及对微生物种群结构的影响, 以期在未来污水处理厂中, 降低磷回收阶段对碳源的需求.

1 材料与方法

1.1 试验装置

接种污泥取自苏州市高新区第一污水处理厂, 将悬浮填料浸没在污泥中闷曝 24 h 使附着. 容积为 2 L 的玻璃反应器置于 DF-101s 恒温水浴加热磁力搅拌锅中, 保持恒温和底部的匀速搅拌. 使用 4 台 DZ-2X 水泵和 1 台 BT100-02 蠕动泵分别完成好氧、厌氧进出水和厌氧基质的进水, 用一台 250 W 小型空压机和微孔曝气石提供好氧阶段的曝气, 通过气体转子流量计控制曝气量. 运行中各阶段工序皆由电子计时器实现自动切换. 试验采用好氧/厌氧 (O/A) SBR 型运行, 运行周期为 4 h 好氧 + 4 h 厌氧, 其中包含瞬间进出水.

装置流程如图 1, 好氧阶段由泵 1 将好氧进水打入反应器, 并由空压机提供曝气条件, 反应结束后, 经泵 2 将反应器中溶液排出; 厌氧阶段, 泵 3 将厌氧进水 (循环液) 打入反应器, 同时由泵 5 将厌



a. 好氧进水罐; b. 厌氧进水/循环罐; c. 厌氧基质罐; d. 磁力搅拌器; e. 空压机; f. 泵: 好氧进水; g. 泵: 好氧出水; h. 泵: 厌氧进水; i. 泵: 厌氧出水; j. 泵: 基质进水; g. 泵: 好氧出水; k. 悬浮填料

图 1 试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental device

氧基质打入反应器, 反应结束后由泵 4 将溶液再次打入回收罐.

1.2 进水和运行条件

1.2.1 进水条件

使用合成废水作为进水, 其中厌氧基质与水以 1: 9 的比例混合. 好氧基质: (200、100 和 0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) COD (CH_3COONa , 乙酸钠作为碳源), 30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ KH_2PO_4 (5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ P) 和 400 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ NaHCO_3 来获得 $\text{pH} = 7.5$, 以及矿物质元素 [153 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ NH_4Cl (40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ N), 14 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 90 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和 3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{EDTA}\cdot 2\text{Na}$] 和微量元素 (0.45 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{FeCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 0.045 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ H_3BO_3 , 0.009 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 0.054 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ KI, 0.036 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 0.018 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{Na}_2\text{MoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 0.036 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和 0.045 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{CoCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$); 厌氧基质: 2 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ COD, 与富集液进行 1: 9 的体积混合, 最终厌氧段初始 COD 为 200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 同样的矿物质元素^[8]. 其中, 好氧阶段 DO 维持在 2 ~ 3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 厌氧阶段通过 ORP 指示, 维持在 -180 ~ -200 mV, 温度维持在 15 ~ 25 $^{\circ}\text{C}$ 之间.

1.2.2 测定方法

COD 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 采用文献[12]的方法测定; 污泥中 P 含量采用 SMT 法测定^[13]; DO 采用 inlab OXI7300 溶氧仪测定 (德国 WTW); ORP 和 pH 采用 pHG-826A PH/ORP 仪监测 (无锡东原).

1.2.3 MiSeq 高通量测序分析方法

污泥取样来自取泥初期和运行末的生物膜污泥. 泥样取出后, 在 14 000 g 下离心 2 min, 去除上清液, 置于 -80 $^{\circ}\text{C}$ 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 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)、1 μL DNA 模板 (10 $\text{ng}\cdot\mu\text{L}^{-1}$)、每种引物各 1 μL (10 $\mu\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)、0.2 μL *Taq* 酶和 12.2 μL 无菌水. 扩增程序是 PCR 扩增采用 94 $^{\circ}\text{C}$ 预变性 3 min; 94 $^{\circ}\text{C}$ 变性 40 s, 56 $^{\circ}\text{C}$ 60 s, 72 $^{\circ}\text{C}$ 60 s, 共 29 个循环, 72 $^{\circ}\text{C}$ 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; 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 OTUs (operational taxonomic units), 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.

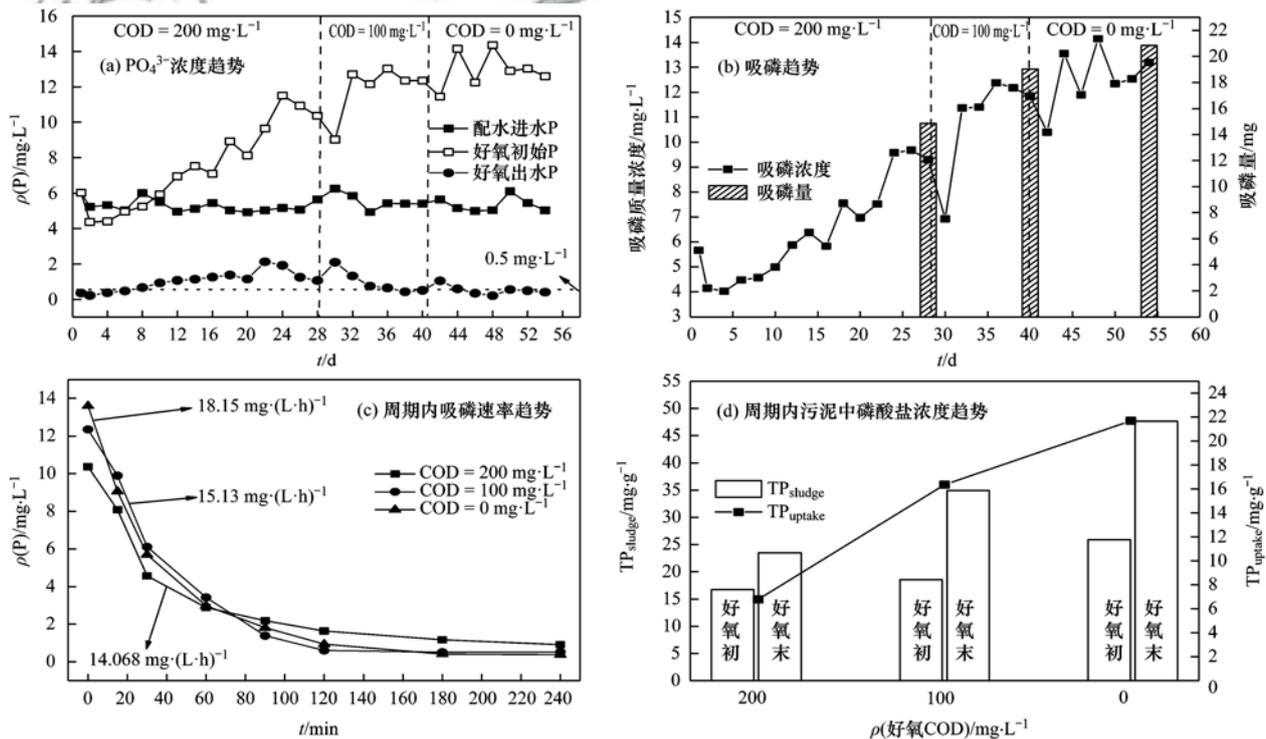
2 结果与讨论

2.1 好氧段碳源对磷吸收的影响

成功驯化后的聚磷生物膜在好氧状态下的 PO_4^{3-} 变化趋势如图 2 所示. 从图 2(a) 可以看出: 在以循环交替式 O/A 运行下, 由于厌氧循环液中磷酸盐得到不断富集, 其高浓度残留相所导致的实际好氧进水浓度不能维持在配水的 $5 \sim 6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 继而引起好氧出水也逐渐升高. 结合图 2(b) 中吸磷浓度的逐渐上升可知, 聚磷生物膜的吸磷能力在不断增强, 但不能抵消循环液高浓度所带来的磷负荷, 而降低好氧段碳源后, 高磷负荷对其影响逐渐削弱, 直至不加好氧碳源, 最后好氧出水可以稳定在 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 符合国家《污水综合排放标

准》一级. 此外, 该体系在每个 COD 阶段后期都存在一个稳态, 即周期内吸磷浓度及吸磷量几乎维持不变, 后通过改变好氧碳源质量浓度, 第一个周期内, 其性能都有一定的下降, 其可能原因是, 底物浓度的变化引起了诱导酶的变化^[14], 从而改变了微生物的特性. 在好氧段 COD 为 200、100 和 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 最大周期内吸磷量分别为 14.87、19.04 和 20.84 mg , 在提高 1.28 倍后继续提高了 1.09 倍, 其吸磷速率也得到相应提高 [图 2(c) 所示], 最大吸磷速率为 $18.15 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, 是 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ COD 下 $14.07 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 的 1.29 倍, 低碳源条件下吸磷时长也相对减少, 在前 3 h 内已基本完成吸收, 也利于好氧状态下的 PAOs 在短时间内维持较高的吸磷效果^[15]. 且在生物膜污泥相中, 周期内最大蓄磷含量从 $23.51 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 提升到 $47.62 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 最大污泥吸磷含量也从 $6.79 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 增加到 $21.69 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 性能提升了 3.19 倍.

以上性能的提升也在一定程度上反映出 PAOs 的活性在逐步提升, 且逐渐在该反应器体系中占主导地位. 这是因为, 对于一般异养微生物, 其增长模式一般以“直接利用”为主, 即当其处于好氧状态下, 并且具有足够的有机基质下才能成长为优势菌群, 而在此厌氧-好氧交替运行模式下, 普通异养菌便不具备优势, 而随着好氧碳源的减少, 其生长速率更加变慢; 相反, 对于 PAOs, 其生长遵循的是



(a) PO_4^{3-} 浓度趋势, (b) 吸磷趋势, (c) 周期内吸磷速率趋势, (d) 周期内污泥中磷酸盐浓度趋势

图 2 好氧段 PO_4^{3-} 变化趋势

Fig. 2 PO_4^{3-} trend diagram under aerobic conditions

“吸收-储存-利用”，即在厌氧条件下，利用充足的有机基质进行吸收，并以胞内聚合物的形式存储于体内，当其处于好氧条件下，便直接利用存储的能量供给自身的合成与增殖^[16]。两相对比，降低好氧碳源不仅表面上得到富磷浓度的提升，且可能在根本上导致普通异养菌逐渐被淘汰，PAOs 逐渐充分发挥其吸磷功能。

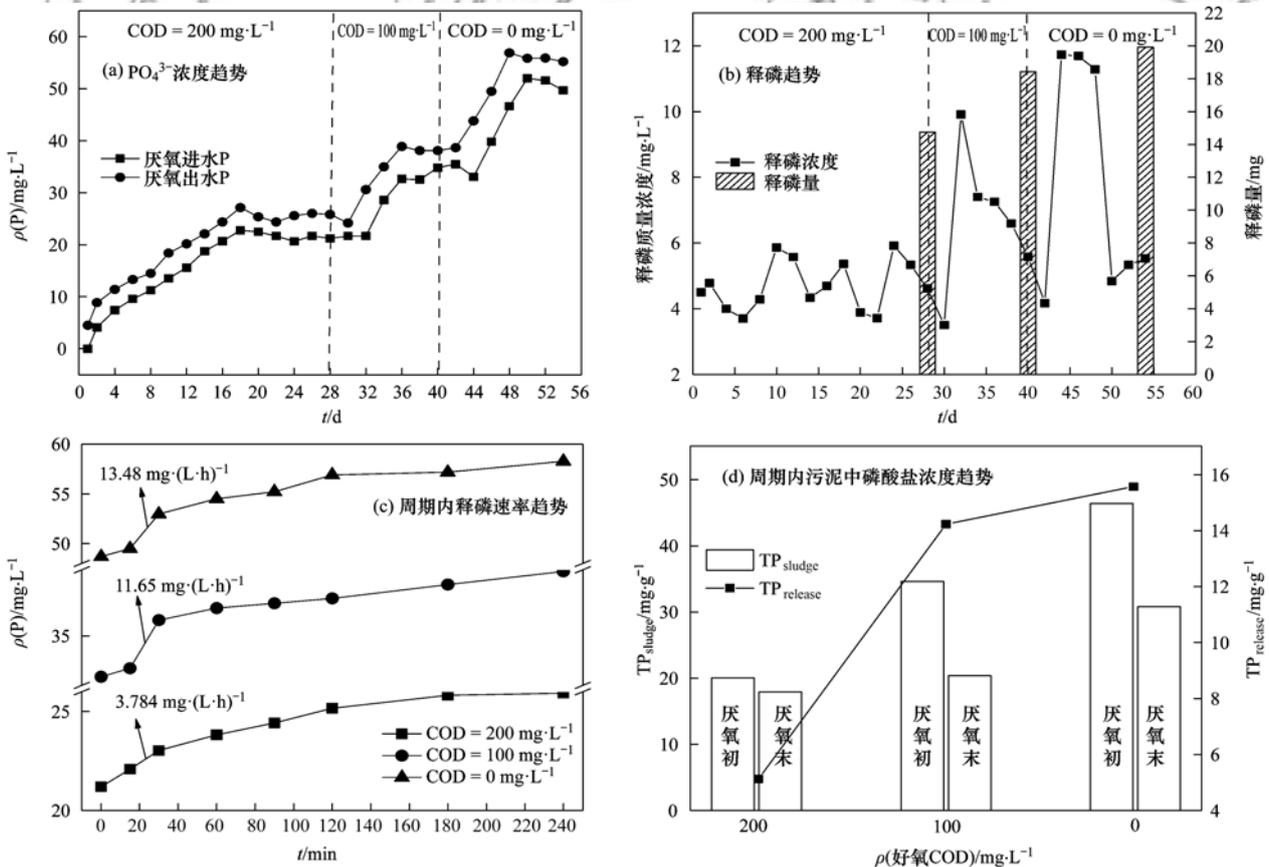
2.2 好氧段碳源对厌氧释磷的影响

好氧段碳源的降低促进了厌氧段的释磷。图 3 (a)可以看出：厌氧循环液中磷酸盐浓度得到呈阶梯式不断升高，且变化明显，降低好氧碳源大大提升了富集性能，富集液从 25.82 mg·L⁻¹依次上升到 38.90 mg·L⁻¹、56.91 mg·L⁻¹，该质量浓度已可以满足鸟粪石结晶的要求^[17]。即降低好氧碳源可以释放更多的磷如图 3(b)所示，从每周期 14.75 mg 提高到 18.41 mg 和 19.91 mg，依次提高了 1.24 倍和 1.08 倍，表明好氧段 200 mg·L⁻¹ COD 很大程度上不利于聚磷菌的释磷，当降低到 100 mg·L⁻¹时厌氧段释磷获得大幅提升，与不加好氧段碳源差异不大。结合图 2 吸磷性能的增幅，其释磷率较低还受外界高浓度磷酸盐浓度差限制，所以其液相中周期内释磷浓度又回到初始状态下的 5~6 mg·L⁻¹。其

相应的释磷速率也得到提高如图 3(c)所示，最大释磷速率依次为 3.78、11.65、13.48 mg·(L·h)⁻¹，提高了 3.56 倍，且低碳源条件下释磷时长也相对减少，最快在 2.5 h 时内已基本完成。图 3(d)生物膜污泥相中，周期内最大蓄磷含量从 20.07 mg·g⁻¹提升到 46.62 mg·g⁻¹，最大污泥释磷含量也从 5.13 mg·g⁻¹增加到 15.57 mg·g⁻¹，但对比 COD 为 100 mg·g⁻¹和 0 mg·g⁻¹，发现越到后期磷越难释放到液相，大部分磷储存在污泥相中。

此外，对比分析图 2 和图 3 吸释磷性能发现，液相中吸磷量始终大于释磷量，直到磷酸盐富集液浓度达到稳定状态时，其吸磷量逐渐与释磷量达到平衡，依次分别为 14.87 和 14.75、19.04 mg 和 18.41、20.84 和 19.91 mg，但总体上吸磷量大于释磷量；而在固相中，污泥中磷含量也由 16~17 mg·g⁻¹增加至 46~47 mg·g⁻¹，污泥蓄磷逐渐增强，这与 Kodera 等^[8]发现生物膜里仍存在大量磷一致，这可能是由于外界液相中高浓度磷酸盐与胞内形成较大的渗透压，而聚磷菌在此环境下没有足够的推动力使得磷酸盐释放到外界液相中^[18]。

综上可知，随好氧 COD 的减少，无论是吸磷速率和释磷速率都得到了相应地提高，且较郑莹



(a) PO_4^{3-} 浓度趋势, (b) 释磷趋势, (c) 周期内释磷速率趋势, (d) 周期内污泥中磷酸盐浓度趋势

图 3 厌氧段 PO_4^{3-} 变化趋势

Fig. 3 PO_4^{3-} trend diagram under anaerobic conditions

等^[19]利用培养的聚磷生物膜中的最大吸磷速率 $9.25 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 和最大释磷速率 $6.75 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 都有了较大的提升, 分别提升了 1.96 倍和 1.99 倍, 这同时也反映出在作磷酸盐循环富集时, 更有利于聚磷菌能力的提高^[20]; 且高磷条件下尽可能避免了 PAOs 向 GAOs 代谢途径的转变^[21]. 这也更符合未来污水处理厂的资源回收特性, 有助于强化对有机物的回收.

2.3 好氧段碳源对聚磷生物膜的微生物分布变化影响

降低好氧段碳源浓度有利于聚磷菌的富集, 大大抑制了普通异养菌和硝化菌的生长, 强化了聚磷生物膜的筛选机制. 在“门 (Phylum)”与“科 (Family)”水平上, 对不同污泥样品的主导菌群进行分析 (如图 4、5 所示), 在测到的 29 个门 (Phylum) 中, 主要为变形菌门 (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, 作为最丰富的门且是一种潜在的聚磷菌^[22, 23], Proteobacteria 占比由起始的 59.22% 增长至 83.29%, 增量为 24.07%, 远高于普通城市污水处理厂的 48.00%^[24], 而孟璇等^[25]在好氧 COD 为 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下测序较初始污泥增量为 10%, 表明降低好氧碳源可以较大提高变形菌门的富集, 约 2.4 倍. 而对于其他菌门, 拟杆菌门 (Bacteroidetes) 由 4.32% 下降至 2.79%、放线菌门 (Actinobacteria) 由 2.83% 下降至 1.16%、Ignavibacteriae 门由 2.62% 下降至 0.25%; 此外, 作为硝化细菌的硝化螺旋菌门 (Nitrospirae) 占比较重且变化明显, 由 17.59% 下降至 2.57%. 表明在该系统中, 聚磷微生物较硝化生物具有较强的优势, 且以变形菌门为主, 而降低好氧段碳源至 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 后, 可以提高变形菌门约 2.4 倍的富集.

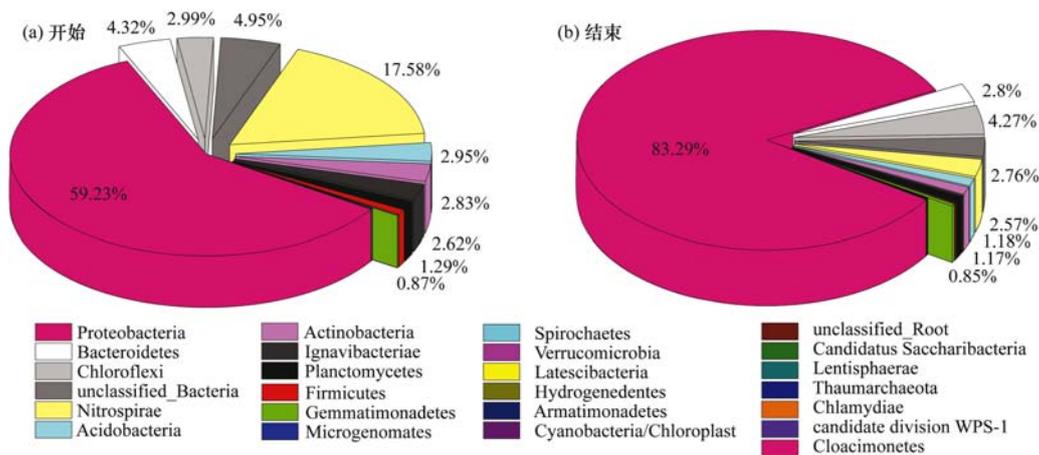


图 4 门级别的微生物分布

Fig. 4 Biofilm microbial community composition at the phylum level

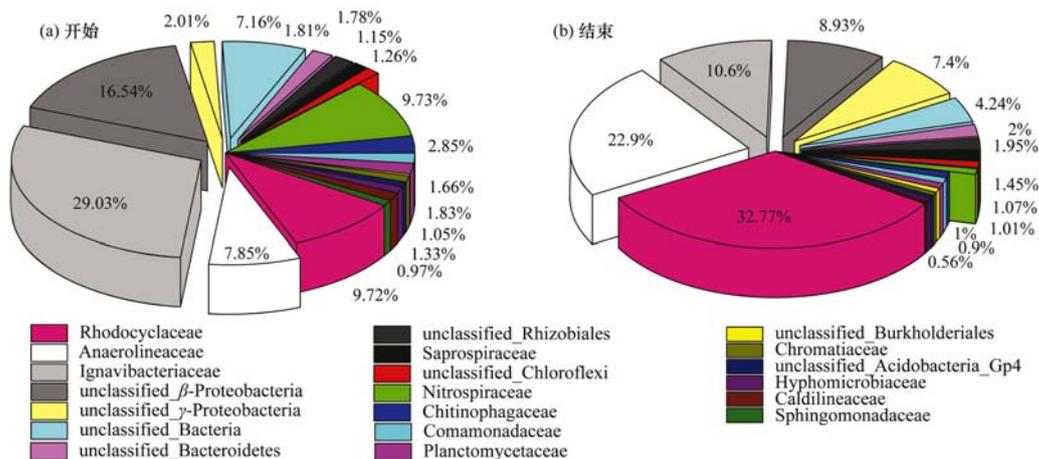


图 5 科级别的微生物分布

Fig. 5 Biofilm microbial community composition at the family level

而在科的水平上进行微生物分析,如图5所示.初始污泥中微生物占比由大到小排序为间孢囊菌科(Ignavibacteriaceae)、未定义的 β -变形菌亚门(unclassified β -Proteobacteria)、红环菌科(Rhodocyclaceae)、厌氧绳菌科(Anaerolineaceae)、硝化螺旋菌科(Nitrospiraceae).在富集结束后,具有除磷功能的红环菌科(Rhodocyclaceae)占比最大,得到了3倍多的富集,由10.10%增长至33.95%,增量为23.85%,为孟璇等^[25]增量10.44%的2.28倍.Zilles等^[26]的研究也表明,在高效除磷系统中红环菌科含量较高,是EBPR系统中的优势聚磷菌.厌氧绳菌科(Anaerolineaceae)由8.15%增长至23.71%,属于绿弯菌门,增量为15.55%,是孟璇等^[27]的试验增量3.10%的5倍.而未定义的 β -变形菌亚门(unclassified β -Proteobacteria)由17.19%下降至9.25%、间孢囊菌科(Ignavibacteriaceae)由30.18%下降至10.97%、硝化螺旋菌科(Nitrospiraceae)由10.12%下降至1.04%,进一步表明在该运行模式下,不具备除磷功能的细菌大幅度地减少.而变形菌门中的红环菌科,绿弯菌门中的厌氧绳菌科,其在好氧碳源为 $0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 相对 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 分别具有2.28和5倍的富集效果,聚磷微生物进行了较高效地富集和筛选.

3 结论

(1)好氧段碳源浓度的降低,有利于吸磷和释磷性能的提升:好氧段COD由 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降到 $0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 后,吸释磷速率分别提升1.29倍和3.56倍,蓄磷量提高2.02倍和2.32倍,周期释磷量提高3.23和3.03倍;污泥蓄磷能力提高2.61倍.

(2)PAOs的富集得到了强化:微生物群落演化中的门水平上,被定义为聚磷菌的变形菌门Proteobacteria占比由起始的59.22%增长至83.29%,降低好氧碳源可以获得变形菌门约2倍的增幅;而在科水平,无论是变形菌门中的红环菌科(10.10%增长至33.95%),还是绿弯菌门中的厌氧绳菌科(8.15%增长至23.7%),富集效果分别提高了2.28和5倍,降低好氧段碳源大大促进了聚磷菌的富集和筛选.

(3)碳源需求量的减少,提高了PAOs的性能,也使得该磷回收工艺在未来污水厂的主流工艺中更具经济可行性.

参考文献:

[1] Van Loosdrecht M C M, Brdjanovic D. Anticipating the next century of wastewater treatment [J]. *Science*, 2014, **344** (6191): 1452-1453.
[2] Li W W, Yu H Q, Rittmann B E. Chemistry: Reuse water

pollutants[J]. *Nature*, 2015, **528**(7580): 29-31.
[3] Barnard J L, Stevens G M, Leslie P J. Design strategies for nutrient removal plant [J]. *Water Science and Technology*, 1985, **17**(11-12): 233-242.
[4] Ali H I, Abd El-Azim M M, Abd El-Rahman M S, et al. The effects of modification for contact stabilization activated sludge on EBPR[J]. *HBRC Journal*, 2015, **11**(1): 143-149.
[5] Wong P Y, Cheng K Y, Bal Krishna K C, et al. Improvement of carbon usage for phosphorus recovery in EBPR-r and the shift in microbial community[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, **218**: 569-578.
[6] 方柳静. 生物膜处理城市污水脱氮除磷总结及展望[J]. *资源节约与环保*, 2018, (5): 98.
[7] 邹东雷, 李平, 杨卓悦, 等. 序批式移动床生物膜反应器强化反硝化除磷处理低碳源污水[J]. *科技导报*, 2016, **34** (2): 237-240.
Zou D L, Li P, Yang Z Y, et al. Enhanced denitrifying phosphorus removal to treat low carbon source sewage in sequencing batch moving bed biofilm reactor [J]. *Science & Technology Review*, 2016, **34**(2): 237-240.
[8] 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.
[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] Guisasaola A, Pijuan M, Baeza J A, et al. Aerobic phosphorus release linked to acetate uptake in bio-P sludge: Process modeling using oxygen uptake rate [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2004, **85**(7): 722-733.
[11] 唐旭光, 王淑莹, 彭永臻, 等. SBR法好氧段碳源浓度对吸磷的影响[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2011, **42**(10): 3220-3224.
Tang X G, Wang S Y, Peng Y Z, et al. Effect of carbon source on phosphorus uptake in aerobic condition[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2011, **42** (10): 3220-3224.
[12] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
[13] Ruban V, López-Sánchez J F, Pardo P, et al. Development of a harmonised phosphorus extraction procedure and certification of a sediment reference material [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2001, **3**(1): 121-125.
[14] 袁林江, 周国标, 南亚萍. 微生物聚磷及其酶学调控[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(7): 1955-1962.
Yuan L J, Zhou G B, Nan Y P. Review on microbial polyphosphate accumulation and its enzymological regulation[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(7): 1955-1962.
[15] Wong P Y, Ginige M P, Kaksonen A H, et al. The ability of PAOs to conserve their storage-driven phosphorus uptake activities during prolonged aerobic starvation conditions [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2018, **23**: 320-326.
[16] Majone M, Massaniso P, Ramadori R. Comparison of carbon storage under aerobic and anoxic conditions[J]. *Water Science and Technology*, 1998, **38**(8-9): 77-84.
[17] Jaffer Y, Clark T A, Pearce P, et al. Potential phosphorus recovery by struvite formation[J]. *Water Research*, 2002, **36** (7): 1834-1842.
[18] 任皓甜, 袁林江. 磷酸盐浓度及 pH 对聚磷菌吸磷能力的影

- 响[J]. 工业微生物, 2018, **48**(4): 17-23.
- Ren H T, Yuan L J. Effects of phosphate concentration and pH on phosphorus uptake by phosphorus-accumulating bacteria[J]. *Industrial Microbiology*, 2018, **48**(4): 17-23.
- [19] 郑莹, 潘杨, 周晓华, 等. 一种新型生物膜法除磷工艺中聚磷菌的富集培养过程[J]. 环境科学, 2017, **38**(1): 277-282.
- Zheng Y, Pan Y, Zhou X H, *et al.* Process of enrichment and culture of PAOs on a novel biofilm process of dephosphorization [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 277-282.
- [20] 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.
- [21] Acevedo B, Murgui M, Borrás L, *et al.* New insights in the metabolic behaviour of PAO under negligible poly-P reserves [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, **311**: 82-90.
- [22] Nguyen H TT, 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.
- [23] 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.
- [24] Qiu G L, Zuniga-Montanez R Z, Law Y Y, *et al.* Polyphosphate-accumulating organisms in full-scale tropical wastewater treatment plants use diverse carbon sources [J]. *Water Research*, 2019, **149**: 496-510.
- [25] 孟璇, 潘杨, 章豪, 等. 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[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2803-2809.
- Meng X, Pan Y, Zhang H, *et al.* Microbial population dynamics during domestication and cultivation of biofilm to remove and enrich phosphate [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2803-2809.
- [26] 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: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2002, **46**(1-2): 123-128.
- [27] 孟璇, 章豪, 徐林建, 等. 同步去除并富集磷酸盐生物膜的驯化研究[J]. 现代化工, 2018, **38**(10): 85-90, 92.
- Meng X, Zhang H, Xu L J, *et al.* Study on domestication and cultivation of biofilm to remove and enrich phosphates [J]. *Modern Chemical Industry*, 2018, **38**(10): 85-90, 92.

CONTENTS

Health Benefit Evaluation for Air Pollution Prevention and Control Action Plan in China	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (2961)
Scenario Simulation Study Constrained by the Ambient Air Quality Standards in Nanjing	XIE Fang-jian, SHI Zhi-hao, LI Jing-yi, <i>et al.</i> (2967)
Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Zhengzhou	YANG Liu-ming, WANG Shen-bo, HAO Qi, <i>et al.</i> (2977)
Relationship Between Atmospheric Visibility and PM _{2.5} Concentrations and Distributions	WANG Ji-kang, ZHANG Heng-de, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (2985)
Characteristics of VOCs Emitted from the Rubber Tire Manufacturing Industry Based on the Inverse-Dispersion Calculation Method	BAI Hong-xiang, WEI Wei, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (2994)
Stable Carbon Isotope Compositions and Source Apportionments of Volatile Aromatic Compounds in the Urban Atmosphere of Taiyuan, China	LI Ying-hui, YAN Yu-long, LI Zhi-sheng, <i>et al.</i> (3001)
Spectral Distribution and Pollution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Air of an Office Building Clustered Area	WANG Lin, DENG Ya-jia, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3008)
Characterizing Chromophoric Dissolved Organic Matter in Key Lakes in the Middle Reaches of the East Route of the South-North Water Diversion Project	ZHANG Liu-qing, PENG Kai, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (3018)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes in Different Water Bodies in Hilly and Gully Regions of the Loess Plateau	ZHANG He-hui-zi, YU Kun-xia, LI Zhan-bin, <i>et al.</i> (3030)
Analysis of Total Organic Carbon Source Differences Between New and Old Cascade Reservoirs using Carbon and Nitrogen Isotopes	WANG Cong-feng, HU Zi-long, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (3039)
Pollution Sources and the Stratification Effects on Water Quality in Lijiahe Reservoir	XU Jin, HUANG Ting-lin, LI Kai, <i>et al.</i> (3049)
Distribution and Potential Risk of Organochlorine Pesticides in the Soil of a Submerged Area Around Miyun Reservoir	WANG Xia, ZHANG Qing-zhuo, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3058)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Waters of the Yinchuan Wetlands	TIAN Da-nian, DANG Li-hui, DING Run-mei, <i>et al.</i> (3068)
Comparison of the Geochemical Characteristics of Karst Springs of a Vertically Zoned Climate Region under Human Activity: A Case of Shuifang Spring and Bitan Spring in the Jinfo Mountain Area, Chongqing	XIE Guo-wen, YANG Ping-heng, SHENG Ting, <i>et al.</i> (3078)
Groundwater Chemical Characteristics and Analysis of Their Controlling Factors in an Alluvial Fan of Jianjiang River	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (3089)
Dynamics of Epilithic Algae Communities and Their Relationship with Environmental Factors During Storage and Non-storage Periods in the Three Gorges Reservoir	FU Jun-ke, LIU Li, HE Xin-yu, <i>et al.</i> (3099)
Influence of Rainfall on the <i>in situ</i> Growth of Dominant Algae Species in Xiangxi River	WENG Chuan-song, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (3108)
Decomposition of <i>Myriophyllum aquaticum</i> and the Associated Release of Nitrogen and Phosphorus	TONG Xiong, LUO Pei, LIU Feng, <i>et al.</i> (3118)
Optimization of the Parameters for Microalgae Immobilization and Analysis of Its Recovery Potential for Ammonia Nitrogen in Wastewater	LIU Xiang, WANG Jing-yao, WU Juan-juan, <i>et al.</i> (3126)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Titanate Nanotubes	ZHANG Zheng, FENG Chang-sheng, ZHANG Xiao-nui, <i>et al.</i> (3135)
Application of Fenton-like Photocatalysts Based on Defect Reconstruction in Degradation of Dye Wastewater	TANG Qing-wen, AN Xiao-qiang, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (3146)
Degradation of RBK5 with Peroxymonosulfate Efficiently Activated by N-Doped Graphene	YU Yong-bo, HUANG Wan, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (3154)
Effect of Cu ²⁺ on Denitrification Using NO ₂ ⁻ as an Electron Acceptor	MAI Wen-ke, PENG Yong-zhen, JI Jian-tao (3162)
Start-up and Performance Optimization of a CANON Pilot Reactor	SUN Qing-hua, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (3169)
Effects of Aerobic Carbon Sources on Biofilm with Simultaneous Phosphate Removal and Enrichment	XU Lin-jian, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (3179)
Effect of Organic Characteristics on Sludge Settability in an AAO System	LIU Xiao-bo, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (3186)
Effect of Free Nitrous Acid on the Activity of Nitrifying Bacteria in Different Sludge Concentrations Under Anoxic Conditions	LÜ Xin-tao, ZHOU Tong, TIAN Xia-di, <i>et al.</i> (3195)
Stability of ZVI-dependent Autotrophic Denitrification by ANAMMOX Bacteria	ZHANG Wen-jing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3201)
Effect of On-line NaClO Backwashing on Microbial Communities in an Inverted A ² O-MBR System	WANG Xu-dong, GAO Miao, WANG Ying-ying, <i>et al.</i> (3208)
Evaluation of Organic Matter Release and Economy for Various Pretreatments of Sewage Sludge	YUAN Yue, TAN Xue-jun, ZHENG She-yu (3216)
Model-based Optimization for the Coordinated Supply of Clear and Reclaimed Water in the Central Districts of Beijing, China	ZHANG Tian-yuan, TAN Qian, WANG Shu-ping (3223)
Occurrence and Removal of N-nitrosamines in the Wastewater Treatment Plants Using Different Treatment Processes	LIU Wang-rong, ZHAO Jiang-liang, YANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3233)
Occurrence of Tramadol and Fentanyl Use in Domestic Wastewater in Beijing	ZHOU Zi-lei, DU Peng, BAI Ya, <i>et al.</i> (3242)
Pollution Level and Ecological Risk of Typical Antibiotics in Guiyang Wastewater Treatment Plants	YANG Zhao, LI Jiang, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Various Livestock Feedlot Soils of the Hilly Purple Soil Region	CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, LIU Chen (3257)
Effects of Tetracycline on Microbial Communities and Antibiotic Resistance Genes of Vermicompost from Dewatered Sludge	CHEN Jing-yang, XIA Hui, HUANG Kui, <i>et al.</i> (3263)
Fate of Antibiotic Resistance Genes and Virulence Genes in Enterococci During Anaerobic Digestion Process of Thermal Hydrolyzed Sludge	LI Hui-li, PEI Yuan-mei, LI Shan, <i>et al.</i> (3270)
Effect of Co-composting of Chicken Manure with Chinese Medicinal Herbal Residues on Antibiotic Resistance Genes	WU Jin-ping, CHEN Jian-wen, LIU Yong, <i>et al.</i> (3276)
Spatio-temporal Patterns of Microbial Communities and Their Driving Mechanisms in Subalpine Lakes, Ningwu, Shanxi	WANG Xue, LIU Jin-xian, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (3285)
Community Structure Characteristics of <i>nirS</i> Denitrifying Bacteria of Spring Typical Parkland Waterbodies in Shijiazhuang City	ZHANG Yi-ran, LI Zai-xing, SUN Yue, <i>et al.</i> (3295)
Differential Responses of Rhizospheric <i>nirK</i> - and <i>nirS</i> -type Denitrifier Communities to Different Phosphorus Levels in Paddy Soil	ZHAN Yu, GAO Dan-dan, SHENG Rong, <i>et al.</i> (3304)
Comparison of Soil Bacterial Community Structure Between Paddy Fields and Dry Land in the Huixian Karst Wetland, China	JIA Yuan-hang, JIN Zhen-jiang, YUAN Wu, <i>et al.</i> (3313)
Cd Balance Analysis of a Typical Rice Paddy System in Central Hunan	JIANG Kai, DENG Xiao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3324)
Effects of an Amendment on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System	LI Yi-chun, WANG Yan-hong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (3331)
Isolation of Heavy Metal Immobilizing and Plant Growth-Promoting Bacteria and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Wheat	HAN Hui, WANG Xiao-yu, CAI Hong, <i>et al.</i> (3339)
Differences in the Cadmium-Enrichment Capacity and Subcellular Distribution and Chemical Form of Cadmium in Different Varieties of Pepper	PENG Qiu, LI Tao, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (3347)
Effect of Phosphorus Addition on N ₂ O Emissions from Rice-Rapeseed Rotation Soils	SUN Zheng, SU Rong-lin, XU Peng, <i>et al.</i> (3355)
Impact of Land Use Type on the Stability and Organic Carbon Content of Soil Aggregates in the Weibei Dryland	LIU Jie, MA Yan-ting, WANG Xian-ling, <i>et al.</i> (3361)
Vertical Distribution Characteristics of PAHs in Soils with Different Land Use Types During Rapid Urbanization	LU Yin-tao, XIANG Xin-xin, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (3369)
Pollution Levels, Sources, and Spatial Distribution of Phthalate Esters in Soils of the West Lake Scenic Area	LIAO Jian, DENG Chao, CHEN Yi, <i>et al.</i> (3378)
Impact of Biochar on Soil Bulk Density and Aggregates of Lou Soil	LI Qian-qian, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (3388)