

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.5
第40卷 第5期

目次

2016年10~11月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律	张晗宇,程水源,姚森,王晓琦,张俊峰(1999)
餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征	王红丽,景盛翱,乔利平(2010)
泰山顶(1534 m)夏季气溶胶粒径分布特征	沈利娟,王红磊,银燕,陈魁,陈景华,施双双(2019)
郑州-新乡冬季PM _{2.5} 中元素浓度特征及其源分析	闫广轩,张朴真,黄海燕,高雅,张靖雯,宋鑫,张佳羽,李怀刚,曹治国,姜继韶,樊静,王跃思,金彩霞(2027)
我国PM _{2.5} 浓度分阶段改善目标情景分析	贺晋瑜,燕丽,王彦超,雷宇,汪旭颖(2036)
安阳市典型工业源PM _{2.5} 排放特征及减排潜力估算	杜小申,燕丽,贺晋瑜,汪旭颖,王克,张瑞芹(2043)
郑州市典型工业炉窑细颗粒物排放特征及清单	赵庆炎,韩士杰,张铁舜,杨留明,张瑞芹,燕启社(2052)
2015年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性	乔月珍,陈凤,赵秋月,刘倩(2062)
兰州市化石燃料燃烧源排放VOCs的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势	刘镇,朱玉凡,郭文凯,刘晓,陈强(2069)
12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征	李双江,袁相洋,李琦,冯兆忠(2078)
我国典型陆地生态系统水化学离子特征及空间分布	黄丽,张心昱,袁国富,朱治林,唐新斋,孙晓敏(2086)
我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价	刘昔,王智,王学雷,李珍,杨超,厉恩华,位慧敏(2094)
我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价	范博,王晓南,黄云,李霖,高祥云,李雯雯,刘征涛(2101)
大连海域入海污染源中PFASs的赋存、输入通量和季节特征	陈虹,韩建波,张灿,程嘉熠(2115)
干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义	袁瑞丰,李宗省,蔡玉琴,邹海明(2122)
柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素	黄奇波,覃小群,刘朋雨,程瑞瑞,李腾芳(2132)
崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素	周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,覃小群,黄奇波,张连凯(2143)
三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析	秦延文,韩超南,郑丙辉,马迎群,杨晨晨,刘志超,张雷,赵艳民(2152)
三峡水库蓄水至175 m后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力	黎睿,潘婵娟,汤显强,肖尚斌,李青云,杨文俊(2160)
不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素	李莹杰,王丽婧,李虹,欧阳美凤(2170)
巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源磷的响应及释放风险	李如忠,鲍琴,戴源(2178)
闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析	徐健,袁旭音,叶宏萌,张晓辉,周慧华,韩年(2186)
生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应	蒋倩文,刘锋,彭英湘,王华,姚燃,李红芳,罗沛,刘新亮,吴金水(2194)
太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估	张杰,郭西亚,曾野,邓建才(2202)
三峡水库支流汝溪河口水体汞的时空变化特征	马尉斌,陈秋禹,尹德良,孙涛,王永敏,王定勇(2211)
多功能型城市人工湿地水体汞分布特征及其量变分析	刘伟豪,王永敏,樊宇飞,吕东威,王定勇(2219)
不同类型城市人工湿地水体汞的分布特征	樊宇飞,刘伟豪,孙涛,苑萌,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2226)
微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响	黄福义,杨凯,张子兴,苏建强,朱永官,张娟(2234)
上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析	吴杰,熊丽君,吴健,沙晨燕,唐浩,林匡飞,李大雁,沈城(2240)
异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系	王振方,张玮,杨丽,徐玉萍,赵凤斌,王丽卿(2249)
水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析	刘雪晴,黄廷林,李楠,杨尚业,李扬,徐进,王涵玥(2258)
绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应	毕业亮,吴诗敏,周思宁,吴尚华,宿辉,白志辉,徐圣君(2265)
紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能	伏芝萱,郭迎庆,楚文海(2271)
UV降解水溶液中拉法辛的影响因素及机制	吕娟,许志伟,王言(2278)
铝代水铁矿协同吸附砷的机制	黄博,郭朝晖,肖细元,彭驰,朱惠文,史磊,阳安迪(2287)
新型材料磁性氧化铁的除氟效能	方文侃,李小娣,方菁,吴德意(2295)
羧基改性阴极对微生物电合成系统产乙酸性能的影响机制	祁家欣,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(2302)
基于分区供氧与溶解氧调控的低C/N比污水短程硝化反硝化	吴春雷,荣懿,刘晓鹏,史会欣,章武首,金鹏康,马文伟(2310)
不同COD浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征	马艳红,赵智超,安芳娇,黄利,师晓娟,慕浩,陈永志(2317)
15℃SBBR短程硝化快速启动和稳定运行性能	孙艺齐,卞伟,李军,赵青,王文啸,梁东博,吴耀东(2326)
长期低聚磷条件对AO-SBR系统Accumulibacter代谢特性的影响	王少坡,李柱,赵乐丹,于静洁,赵明,郑胜达,孙力平(2333)
厌氧氨氧化颗粒污泥EPS及其对污泥表面特性的影响	杨明明,刘子涵,周杨,祁菁,赵凡,郭劲松,方芳(2341)
HN-AD菌生物强化接触氧化工艺处理猪场沼液	刘向阳,张千,吴恒,李宸,唐健泓,封丽,肖芃颖,赵天涛(2349)
温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响	黄方玉,邓良伟,杨红男,杨含,肖友乾,王兰(2357)
城市污水处理系统真核微生物群落特性与地域性差异	秦文韬,张冰,孙晨翔,陈湛,文湘华(2368)
三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响	王娜,高婕,魏静,刘颖,庄绪亮,庄国强(2375)
亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制	刘晋仙,李鑫,罗正明,王雪,暴家兵,柴宝峰(2382)
生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响	刘杰云,邱虎森,王聪,沈健林,吴金水(2394)
地膜覆盖和施肥对菜地CH ₄ 排放的影响	倪雪,江长胜,陈世杰,李晓茜,石孝均,郝庆菊(2404)
亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响	王晓云,蔡焕杰,李亮,徐家屯,陈慧(2413)
不同施肥模式对热区晚稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	田伟,伍延正,汤水荣,胡玉麟,赖倩倩,文冬妮,孟磊,吴川德(2426)
周期性变温对紫色土有机碳矿化的影响	曾蔓蔓,慈恩,樊晶晶,李江文,翁吴璐,李松(2435)
广西高镉异常区水田土壤Cd含量特征及生态风险评价	宋波,王佛鹏,周浪,吴勇,庞瑞,陈同斌(2443)
超富集植物藿香薹(Ageratum conyzoides L.)对镉污染农田的修复潜力	张云霞,宋波,宾娟,周子阳,陈记玲,陈同斌(2453)
种植油菜麦评价多环芳烃污染土壤的农用风险	焦海华,郭佳佳,张婧旻,张晓霞,茹文明,白志辉(2460)
土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应	舒心,李艳,李锋,冯靖仪,沈嘉瑜,史舟(2471)
某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价	吕占禄,张金良,陆少游,邹天森,刘凯,张晗,谷亚亚(2483)
《环境科学》征订启事(2018)	《环境科学》征稿简则(2042)
信息(2114, 2348, 2393)	

长期低聚磷条件对 AO-SBR 系统 *Accumulibacter* 代谢特性的影响

王少坡^{1,2}, 李柱^{1,2}, 赵乐丹^{1,2}, 于静洁^{1,2}, 赵明³, 郑胜达⁴, 孙力平^{1,2}

(1. 天津市水质科学与技术重点实验室, 天津 300384; 2. 天津城建大学环境与市政工程学院, 天津 300384; 3. 哈尔滨工业大学环境学院, 哈尔滨 150001; 4. 天津三博水科技有限公司, 天津 300384)

摘要: 为了考察长期低聚磷 (Poly-P) 条件下 *Accumulibacter* 的菌群结构及其代谢特性的变化, 采用两个 SBR 反应器, 分别采用乙酸钠和丙酸钠为有机碳源, 接种富含 *Accumulibacter* 的活性污泥, 在进水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度为 $2.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的低磷进水条件下运行 60 d, 对系统除磷性能、污泥浓度、主要菌群结构的变化进行研究. 结果表明, 长期低 Poly-P 条件下两个 SBR 系统均表现出良好的除磷和去除有机物的性能, 但两个系统内的菌群代谢均表现出聚糖菌代谢特征; 运行 60 d 后, 丙酸盐系统中 *Accumulibacter* I 型仍保持了较高的丰度 ($40\% \pm 7\%$), 表明丙酸盐 SBR 系统中 *Accumulibacter* I 型不仅具有较高的代谢活性, 还能够长期低聚磷条件下以一种不依赖 Poly-P 的代谢方式进行生存; 对比发现, 丙酸盐碳源更有利于 *Accumulibacter* 适应低磷负荷的运行环境, 且在低磷负荷的运行环境下 *Accumulibacter* I 型比 II 型更具竞争优势.

关键词: *Accumulibacter*; 聚磷代谢 (PAM); 聚糖代谢 (GAM); 荧光原位杂交 (FISH); 代谢迁移

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)05-2333-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201810099

Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of *Accumulibacter* in AO-SBR System

WANG Shao-po^{1,2}, LI Zhu^{1,2}, ZHAO Le-dan^{1,2}, YU Jing-jie^{1,2}, ZHAO Ming³, ZHENG Sheng-da⁴, SUN Li-ping^{1,2}

(1. Tianjin Key Laboratory of Aquatic Science and Technology, Tianjin 300384, China; 2. School of Environmental and Municipal Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 3. School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 4. Tianjin Sambo Water Technology Corporation Limited, Tianjin 300384, China)

Abstract: To investigate the changes in microbial community structure and metabolic properties of *Accumulibacter* under long-term Poly-P deficiency, an activated sludge enriched with *Accumulibacter* was inoculated into two SBR reactors, where sodium acetate and sodium propionate were used separately as organic carbon sources. The two reactors were operated for 60 days with an influent $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ concentration of $2.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. The phosphorus removal performance, sludge production, and changes in the microbial community structure of the systems were analyzed. The results indicated that both SBR systems showed good performance of phosphorus and organic matter removal. However, microorganisms in both systems showed glycogen-accumulating metabolism properties under long-term Poly-P deficiency. In the unfavorable environment of long-term Poly-P deficiency, *Accumulibacter* I maintained a high abundance ($40\% \pm 7\%$) in the propionate SBR system, indicating that *Accumulibacter* I had higher metabolic activity and its metabolic properties could be independent of Poly-P for survival under Poly-P deficiency for a long period. In comparison, propionate is more conducive to *Accumulibacter* adaptation to lower phosphorus loads, and *Accumulibacter* I is more competitive than *Accumulibacter* II under lower phosphorus loads.

Key words: *Accumulibacter*; polyphosphate accumulating metabolism (PAM); glycogen accumulating metabolism (GAM); fluorescence in situ hybridization (FISH); metabolic shift

强化生物除磷 (EBPR) 工艺是一种经济且环保的活性污泥法污水生物除磷工艺, 其中主要的功能微生物为聚磷菌 (PAOs). 为了促进这类微生物的生长并去除磷, 首先需要厌氧条件, 然后是好氧或缺氧条件, 即当活性污泥通过交替的厌氧-好氧循环时, 具有 PAO 表型的微生物可以从液相中吸收磷酸盐并将其作为胞内多聚磷酸盐储存, 并且在厌氧条件下吸收挥发性脂肪酸 (VFA) 并将其储存为聚- β -羟基链烷酸酯 (PHA) [1~3]. VFA 的吸收和储存需要能量和还原力. 所需的还原力 (NADH) 是从

糖酵解获得的 [4], 而需要的 ATP 一部分是由糖酵解得到, 还有聚磷转化作补充. 有研究表明, 当多聚磷酸盐的能量产生途径受限制时, PAO 中的糖酵解也可以作为产生能量的主要途径 [5~8]. 在后续的好氧阶段, 微生物氧化 PHA 并利用能量恢复其聚磷 (Poly-P) 含量以及其它代谢过程. “*Candidatus Accumulibacter phosphatis* (*Accumulibacter*)” 在许多实

收稿日期: 2018-10-16; 修订日期: 2018-11-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51678388)

作者简介: 王少坡 (1975 ~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为污水生物脱氮除磷技术, E-mail: wspfr@sina.com

验室 EBPR 系统以及生产规模污水处理厂中被鉴定为具有 PAO 表型的微生物^[9-11], *Accumulibacter* 分为 I 和 II 两大类(以下分别以 Acc. I 和 Acc. II 表示), 有人采用不同有机碳源富集到了不同类型的 *Accumulibacter*^[12]. 另一类微生物“*Candidatus Competibacter phosphatis*”被认为与 *Accumulibacter* 竞争乙酸盐 (Acetate), 表现出聚糖菌 (GAO) 表型^[2,13]. PAO 和 GAO 二者皆可在厌氧条件下累积 PHA, 其用于好氧/缺氧条件下合成糖原^[14]. 但对于 GAO 而言, 糖原代替 Poly-P 作为能量来源, 用于 VFA 的摄取和储存, 它们对 EBPR 没有贡献^[15]. 因此, 在 EBPR 系统内 GAO 的出现被认为是导致生物除磷性能恶化的重要因素.

一般认为, *Accumulibacter* 依赖于 Poly-P, 并且磷酸盐浓度有限时, *Accumulibacter* 就会被系统淘汰^[16]. 然而, 有研究表明, 在短期实验中, *Accumulibacter* 以较低的动力学速率能够进行 GAO 代谢(即糖原提供 VFA 摄取所需的所有能量)^[7,17]. 当胞内 Poly-P 含量降低时, $P_{\text{释放}}/HAc_{\text{摄取}}$ 比率降低. GAO 的存在会影响厌氧化学计量比的变化, 除此之外, 不同 PAO 进化枝的富集也是其影响因素, 因为 PAO I 主要依赖于 Poly-P 作为吸收 VFA 的能量来源, 而 PAO II 利用混合的 PAO-GAO 代谢, 其中糖原产生吸收 VFA 所需能量的很大一部分^[18]. 不同进水 P/C 会影响 PAO 的代谢特性, 进而影响系统的性能^[19]. Liu 等^[20]的研究发现, 进水 P/C 比是影响 PAO 和 GAO 之间竞争的关键因素, 该比值降低到 2/100 时, 导致 PAO 中 Poly-P 含量的消耗, 进而被 GAO 取代. 其后, Schuler 等^[21]发现低 P/C 比有利于聚糖代谢 (glycogen accumulating metabolism, GAM), 但不一定引起 GAO 的增长. 其他学者也发现了从聚磷代谢 (polyphosphate accumulating metabolism, PAM) 到聚糖代谢的代谢变化^[6,7,17]. Acc. II 可能在短期低 Poly-P 条件下比 Acc. I 具有竞争优势^[7]. Tian 等^[22]的研究发现, 在 P 限制条件下, Acc. I 无法进行 GAM, 但 Acc. II 型可以将其代谢方式转换为 GAM. 最近, Welles 等^[18]发现了类似的结果, 表明在 P 限制条件下, Acc. I 型和 Acc. II 型都能够将其代谢方式从 PAM 转变为 GAM, 即认为发生了代谢迁移, 但 Acc. II 因其较高的 HAc 摄取率而更易转变. 因此, 低进水 P/C 比或周期性磷酸盐限制可导致 Acc. II 富集, 而高进水 P/C 比可能有利于 Acc. I 的富集^[16,23]. 但是, 对于长期低聚磷条件下 *Accumulibacter* 和 GAO 的菌群结构以及代谢特性变化了解还不多.

因此, 本研究采用两个厌氧/好氧序批式反应

器 (AO-SBR), 分别以乙酸钠和丙酸钠为有机碳源, 营造低磷进水条件, 监测系统的除磷和去除有机物性能、污泥浓度、主要功能菌菌群结构, 并分析典型周期内生物除磷代谢情况, 对长期低聚磷条件对 *Accumulibacter* 和主要 GAO 菌群丰度和组成、代谢特性的影响进行研究, 以确定长期低聚磷条件对 PAO 和 GAO 菌群结构以及 *Accumulibacter* 代谢特性的影响, 并考察经过长期低 Poly-P 条件后的 *Accumulibacter*, 当恢复供给较高浓度磷酸盐时, 是否仍有过量摄取磷酸盐的能力, 以期对 EBPR 系统的稳定运行提供参考和支持.

1 材料与方法

1.1 实验装置与运行方式

两个有效容积为 5L 的 SBR 反应器在常温 ($20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$) 下运行. 反应器每天运行 4 个周期, 每周期 6 h, 其中进水 4 min, 厌氧搅拌 1.5 h, 好氧 2.5 h, 静置及排水 1.5 h, 其余时间闲置. 反应器采用底部进水, 排水比为 50%. 内部采用曝气盘使曝气均匀, 通过转子流量计控制好氧段 DO 在 $2.5 \sim 3.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 每个好氧阶段末期排出污泥, 控制 SRT 为 12 d. 采用微电子时控开关来调节运行状态. 通过投加盐酸或 NaOH 溶液使反应器 pH 保持在 $7.0 \sim 8.8$ 之间.

1.2 种泥及实验水质

接种污泥分别取自实验室两个采用不同碳源 (乙酸钠和丙酸钠) 的 EBPR 系统稳定期富含 *Accumulibacter* 的活性污泥. 实验用水均为人工配水, 两个反应器除投加的碳源不同外, 其它进水水质均相同, 与母反应器相同, 分别以乙酸钠 (SBR-1)、丙酸钠 (SBR-2) 为碳源, 各自运行 60 d. 为了创造一个长期低 Poly-P 的运行环境, 即仅仅满足活性污泥生长对磷元素的基本需求, 将两个系统中进水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的浓度从种泥的 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 减小到 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 具体实验进水水质详见表 1. 每升进水投加微量元素 0.5 mL, 加入硫脲 ($20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 以抑制硝化作用. 微量元素溶液组分见表 2.

表 1 实验进水水质组分

Table 1 Composition of synthetic medium

组分	浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
乙酸钠 (CH_3COONa)	512.50
丙酸钠 ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COONa}$)	342.86
KH_2PO_4	10.97
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	153.75
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	55.13
NH_4Cl	76.43
硫脲	20

表 2 微量元素溶液组分	
Table 2 Composition of trace elements solution	
组分	浓度/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
KI	0.18
H_3BO_3	0.15
$\text{MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.12
$\text{CoCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.15
$\text{Na}_2\text{MoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.06
$\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.03
$\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.12
$\text{FeCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1.5
EDTA	6

1.3 分析项目与方法

定期监测系统中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、COD、MLSS、MLVSS、SVI、pH 和 DO 等参数，通过 WTW (Multi 3430) 便携式多参数测定仪监控 pH 和 DO. $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 采用钼酸铵分光光度法，COD 采用快速消解分光光度法，MLSS、MLVSS、SVI 等参数采用国家规定的标准方法测定. VFA 的测定涉及乙酸、丙酸，采用外标法对其进行定量分析^[24]，采用气相色谱法对 PHA 进行定量，用内标法分析^[25]，蒽酮法测定糖原含量，Poly-P 的分析根据 Acevedo 等^[14]的方法. 为了研究低 Poly-P 对 PAO 代谢的影响，稳定富集 (60 d) 后进行批次实验，在整个实验阶段计算不同

的厌氧 ($\text{P}_{\text{释放}}/\text{HAc}_{\text{摄取}}$ 、 $\text{Gly}_{\text{降解}}/\text{HAc}_{\text{摄取}}$ 、 $\text{PHV}_{\text{合成}}/\text{HAc}_{\text{摄取}}$ 、 $\text{PHB}_{\text{合成}}/\text{HAc}_{\text{摄取}}$ 和 $\text{PHA}_{\text{合成}}/\text{HAc}_{\text{摄取}}$) 和好氧 ($\text{Gly}_{\text{合成}}/\text{PHB}_{\text{降解}}$ 和 $\text{P}_{\text{吸收}}/\text{PHB}_{\text{降解}}$) 化学计量数的值. 为了验证长期低 Poly-P 条件下 *Accumulibacter* 是否还具有除磷能力，在厌氧阶段结束时，向 SBR-1 和 SBR-2 系统中投加 $25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 KH_2PO_4 溶液，观察好氧阶段 *Accumulibacter* 对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的吸收能力.

首先对 SBR-1 和 SBR-2 的接种污泥进行 FISH 表征. 运行 60 d 后，采用 FISH 技术对 SBR-1 和 SBR-2 系统中的 Acc. I、Acc. II 以及 GAOs 菌群进行定量分析. 用 Image J 软件对显微图片进行分析，采用平均光密度法进行计算，*Accumulibacter* 和 GAOs 丰度最终表示为相应探针占全菌探针的平均百分比. 平均值的标准误差用百分比的标准偏差除以图像数量的平方根计算. 本实验过程所用探针包括由 EUB338、EUB338-II 和 EUB338-III 这 3 种探针等比例混合的 EUB338mix 探针 (标记 EBPR 系统中已知的全菌)、Acc-I-444 型探针 (标记 Acc. I)、Acc-II-444 型探针 (标记 Acc. II)、GAOQ989 和 GAOQ431 探针等比例混合的 GAOMIX 探针 (标记 GAOs 菌群). 所有探针的杂交液质量分数均为 35%. 所使用的探针及碱基序列详见表 3.

表 3 FISH 检测所用探针及对应碱基序列 ^[16]				
Table 3 Probes and nucleotide sequences used in FISH detection				
探针名称	目标菌群	探针序列 (5'-3')	标记基团	杂交液质量分数/%
EUB338	大多数细菌	GCTGCCTCCCGTAGGAGT	CY3	35
EUB338-II	浮霉菌门 (<i>Planctomycetales</i>)	GCAGCCACCCGTAGGTGT	CY3	35
EUB338-III	疣微菌门 (<i>Verrucomicrobiales</i>)	GCTGCCACCCGTAGGTGT	CY3	35
Acc-I-444	分支 I A 和其他的 I 型 <i>Accumulibacter</i>	CCCAAGCAATTTCTTCCCC	FITC	35
Acc-II-444	分支 II A、II C、II D 和其他 II 型 <i>Accumulibacter</i>	CCCGTGCAATTTCTTCCCC	FITC	35
GAOQ989	<i>Competibacter</i>	TTCCCGGATGTC AAGGC	FITC	35
GAOQ431	<i>Competibacter</i>	TCCCCGCTAAAGGCTT	FITC	35

2 结果与讨论

2.1 长期低 Poly-P 条件下 EBPR 系统的污泥特性

2.1.1 长期低 Poly-P 条件下 EBPR 系统对 P 和 COD 的去除

两系统在低 Poly-P 条件下运行 60 d，此过程两系统的进水中磷浓度只有 $2.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，即只能满足微生物对磷元素的基本需求，因此两个系统的出水中几乎不含 P，图 1 和图 2 分别为 SBR-1 和 SBR-2 反应器在 60 d 内对 P 和 COD 的去除效果，很明显，两系统出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度分别为 $0.0055\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.0016\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (即 $0.17\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)，并且长期低 Poly-P 条件下微生物仍能保持较高的 COD 去除率，两系统出水 COD 浓度分别为 $0.815\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.801\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ，COD 去除

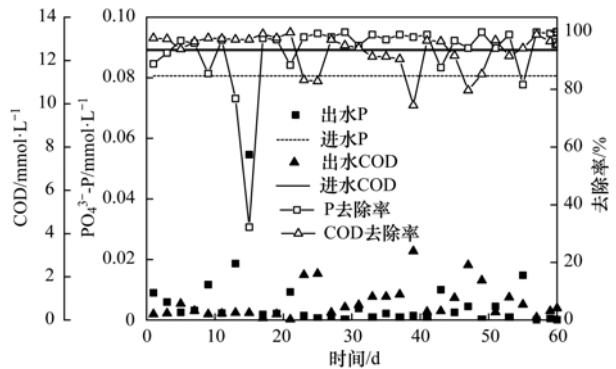


图 1 长期低 Poly-P 条件下 SBR-1 反应器对 P 和 COD 去除情况
Fig. 1 Removal of P and COD by SBR-1 in long-term Poly-P deficiency

率平均在 90% 以上.

2.1.2 长期低 Poly-P 条件下活性污泥的增长特性

图 3 表示长期低 Poly-P 条件下 SBR-1 和 SBR-2

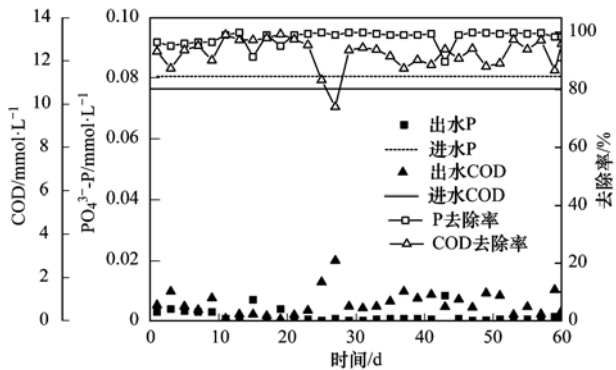


图2 长期低 Poly-P 条件下 SBR-2 反应器对 P 和 COD 去除情况

Fig. 2 Removal of P and COD by SBR-2
in long-term Poly-P deficiency

系统污泥的增长特性, 其中图 3 (a) 和 3 (c) 为 SBR-1 和 SBR-2 系统中 MLSS 以及 SVI 的变化, 图 3 (b) 和 3 (d) 表示 SBR-1 和 SBR-2 系统中 MLVSS 以及 MLVSS/MLSS 的变化. 由图 3 (a) 和 3 (c) 可以看出在长期进水低磷条件下, MLSS 和 SVI 上下波动. 接种至 SBR-1 和 SBR-2 系统的活性污泥初始 MLSS 分别为 $3\,890\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $4\,296\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 但在长期进水低磷的运行环境中平均 MLSS 分别为 $(3\,744 \pm 397)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $(3\,870 \pm 495)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 两个系统中 MLSS 均减小了, 说明进水低磷的环境会减弱 *Accumulibacter* 富集系统的污泥增长速率, 加上每个周期末的定期排泥, 平均 MLSS 呈减小的状态. 运行约 1 周后, 污泥 SVI 慢慢变大, 尤其是 SBR-2 系统, 污泥絮体松散, 污泥沉降性能变差, 平均 SVI 分别为 $(75 \pm 13)\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $(140 \pm 39)\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$. 在

运行过程中 MLVSS 不断增大, SBR-1 和 SBR-2 系统中 MLVSS/MLSS 从初始的 0.62 和 0.54 增加到 0.91 和 0.93 [图 3 (b) 和 3 (d)]. MLVSS/MLSS 反映了污泥中活性部分的含量, 也可以计算出系统中 ISS/MLSS 逐渐降低, 约为 0.09 和 0.07. 通常认为 Poly-P 构成了活性污泥中的无机成分. 因此 MLVSS/MLSS 的增加表明, 污泥中的 Poly-P 成分越来越少, 与实验设计预期的一样, 进水较低的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度创造了一个长期低 Poly-P 的运行环境.

2.2 长期低 Poly-P 条件下 *Accumulibacter* 的代谢特性

2.2.1 长期低 Poly-P 下 EBPR 系统的周期代谢转化

为了探究长期低 Poly-P 条件下 *Accumulibacter* 是否还能够以不依赖 Poly-P 的 GAM 方式进行代谢, 运行约 60 d 后监测一个周期内 SBR-1 [图 4 (a)] 和 SBR-2 [图 4 (b)] 系统的参数变化. 长期进水低磷的环境使 SBR-1 和 SBR-2 系统中的 Poly-P 水平大幅下降. 厌氧初期 SBR-1 系统的 Poly-P 含量由种泥的 $0.206\text{ mg}\cdot\text{mg}^{-1}$ 降低到 $0.010\text{ mg}\cdot\text{mg}^{-1}$, 而 SBR-2 系统的 Poly-P 由 $0.040\text{ mg}\cdot\text{mg}^{-1}$ 降低到 $0.006\text{ mg}\cdot\text{mg}^{-1}$. 两个系统厌氧阶段释磷量均减小, 释磷量分别为 $23.48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (SBR-1) 和 $12.50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (SBR-2). 从图 4 中可以看出在长期低磷的环境中微生物对 VFA 的摄取能力都有所减弱, 厌氧段约 70 min 时, 乙酸和丙酸都不再被消耗, 剩余的 VFA 进入好氧阶段. SBR-1 系统乙酸摄取量为 $4.871\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ [平均乙酸吸收速率为 $0.802\text{ mol}\cdot(\text{mg}\cdot\text{h})^{-1}$], SBR-2 系统丙酸摄取量为 4.827

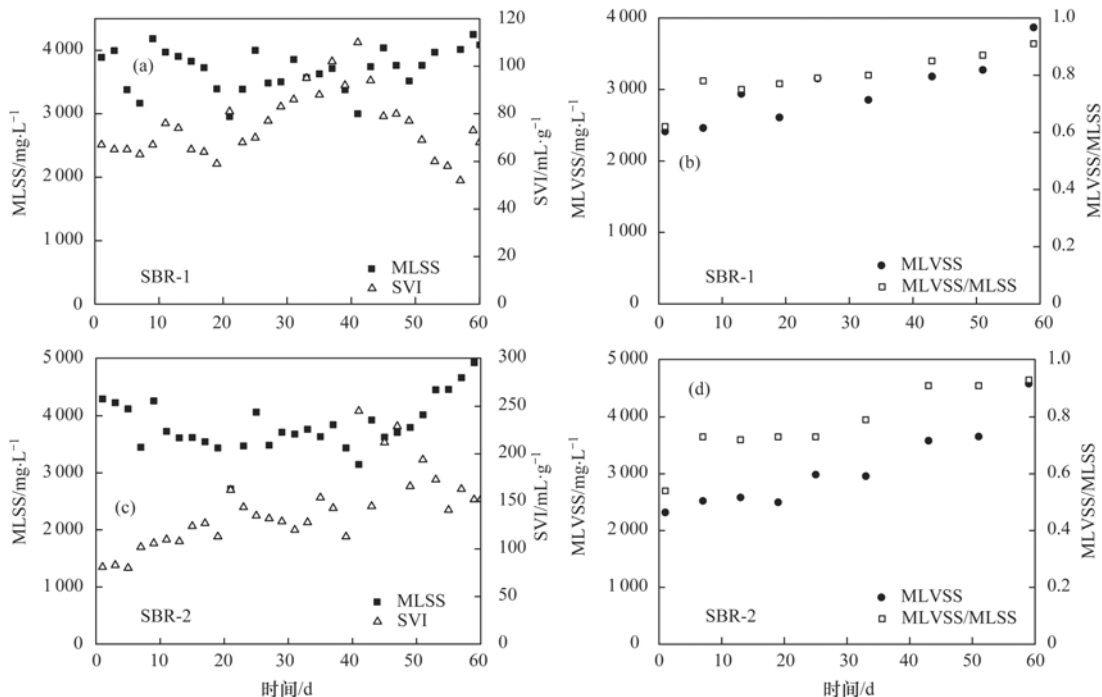


图3 长期低 Poly-P 条件下 SBR-1 和 SBR-2 系统污泥的增长特性

Fig. 3 Enrichment characteristics of sludge in SBR-1 and SBR-2 in long-term Poly-P deficiency

mmol·L⁻¹ [平均丙酸吸收速率为 0.783 mol·(mg·h)⁻¹]. 在长期低 Poly-P 的环境中, 微生物代谢过程中 PHA、Gly 水平大幅增加. 厌氧阶段 SBR-1 系统 PHB 和 PHV 的合成量分别为 1.280 mmol·L⁻¹ 和 0.265 mmol·L⁻¹, 总 PHA 合成量为 1.544 mmol·L⁻¹, Gly 消耗量为 21.122 mmol·L⁻¹. 而 SBR-2 系统中 PHA 合成量为 1.930 mmol·L⁻¹, 其中 PH2MV 和 PHV 分别为 1.203 mmol·L⁻¹ 和 0.726 mmol·L⁻¹, Gly 消耗量为 13.293 mmol·L⁻¹.

好氧阶段 PHA 得到消耗, 重新合成 Poly-P 和 Gly. 两系统 PHA 降解量分别为 3.120 mmol·L⁻¹ 和 2.786 mmol·L⁻¹. 从图 4 中可以看出, 好氧阶段当

Poly-P 合成结束后, Gly 的合成速率明显增大. 这表明相比 Gly, Poly-P 是好氧阶段 *Accumulibacter* 更喜欢的胞内存储聚合物. SBR-1 系统 Poly-P 和 Gly 的合成量分别为 0.587 mmol·L⁻¹ 和 22.154 mmol·L⁻¹; SBR-2 系统分别为 0.106 mmol·L⁻¹ 和 39.387 mmol·L⁻¹. 由图 4 可以看出, 两个系统在较低 Poly-P 条件下, 厌氧阶段 VFA 仍然被摄取, 并且 Gly 消耗量增加, PHA 合成量增加, 在好氧阶段 PHA 降解的过程合成了更多的 Gly. 与种泥相比 (表 4), 不管厌氧阶段还是好氧阶段, SBR-1 和 SBR-2 系统中 PHA、Gly 变化量均得到大幅提高, 意味着 Gly 的利用程度增加了.

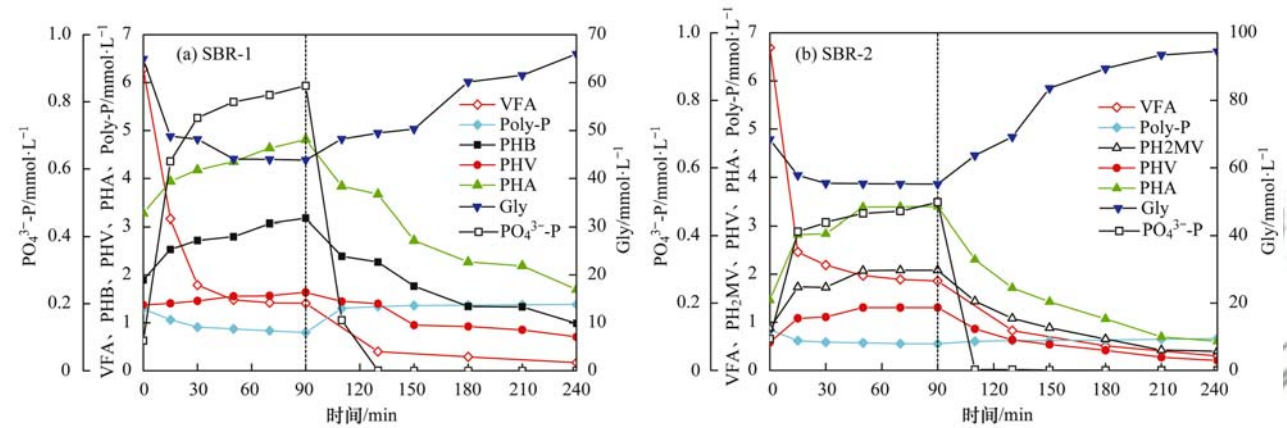


图 4 长期低 Poly-P 下 SBR-1 和 SBR-2 系统的周期代谢转化
Fig. 4 Cyclic metabolic conversions of SBR-1 and SBR-2 in long-term Poly-P deficiency

表 4 长期低 Poly-P 条件和种泥胞内存储聚合物的比较

Table 4 Comparison of intracellular storage polymers between long-term Poly-P deficiency and inoculation sludge							
碳源类型	时间/d	厌氧阶段			好氧阶段		
		PHA _{合成} /mmol·L ⁻¹	Gly _{降解} /mmol·L ⁻¹	Poly-P _{降解} /mmol·L ⁻¹	PHA _{降解} /mmol·L ⁻¹	Gly _{合成} /mmol·L ⁻¹	Poly-P _{合成} /mmol·L ⁻¹
乙酸钠(SBR-1)	0	0.913	1.131	2.473	1.337	2.621	3.446
	60	1.544	21.122	0.496	3.120	22.154	0.587
丙酸钠(SBR-2)	0	1.548	2.786	3.063	1.332	4.578	8.377
	60	1.930	13.293	0.288	2.786	39.387	0.106

厌氧转化的化学计量数表明 (表 5), 虽然较低的 Poly-P 含量限制了从 Poly-P 水解途径获取足够的 ATP 摄取 VFA, 但 VFA 仍然可以被吸收并转化为 PHA, 伴随着较高的 PHA_{合成}/VFA_{吸收} 值, 同时表现为具有较高的 Gly_{降解}/VFA_{吸收} 值、PHB_{合成}/VFA_{吸收} 值、PHV_{合成}/VFA_{吸收} 值、PH2MV_{合成}/VFA_{吸收} 值. 这说明, 在 Poly-P 含量受限不能为 VFA 摄取转化提供足够的 ATP 时, 微生物会增大对 Gly 的利用程度, 通过 Gly 降解过程获得更多的 ATP 以弥补 VFA 摄取时 ATP 的缺乏. 同时 Gly 降解过程除了提供 ATP 以外, 还产生了多余的 NADH, 从而促进合成了更多的 PHA. 而在好氧阶段, P_{吸收}/PHA_{降解} 比值减小, 而 Gly_{合成}/PHA_{降解} 比值增加. 接种至 SBR-1

和 SBR-2 时, 系统分别表现出典型 PAM 代谢和 PAM-GAM 混合代谢, 而长期低 Poly-P 条件下 SBR-1 和 SBR-2 系统都表现出了 GAM 的代谢特征, 即认为发生了代谢迁移.

2.2.2 长期低 Poly-P 条件下 EBPR 系统的菌群变化

EBPR 系统中的功能菌分析, 可以采用化学计量系数分析, 也可以采用分子生物技术. 运行 60 d 后, 采用 FISH 技术对 SBR-1 和 SBR-2 系统中的菌群进行分析. 经过荧光染色后, 随机选取 10 张荧光图片采用 Image J 软件进行分析. 全菌探针采用 CY3 染料染色, 荧光颜色为红色. *Accumulibacter* 或 GAOs 探针采用 FITC 染料, 荧光颜色为绿色. 将相同位置的全菌图片与 *Accumulibacter* 或 GAOs 图片

重叠, 重叠后显示荧光黄色的就是对目标菌群的定位显示. 图 5 和图 6 分别为长期低 Poly-P 条件下 SBR-1 和 SBR-2 系统中 *Accumulibacter* 和 GAO 菌群的荧光图片, 以下图片标尺均为 10 μm .

表 5 长期低 Poly-P 条件与种泥中厌氧好氧化学计量数的比较

Table 5 Comparison of anaerobic and aerobic stoichiometry between long-term Poly-P deficiency and inoculation sludge										
碳源	时间 /d	Poly-P ¹⁾ /mg·mg ⁻¹	厌氧(摩尔比)						好氧(摩尔比)	
			P/VFA	PHA/VFA	PHB/VFA	PHV/VFA	PH2MV/VFA	Gly/VFA	P/PHA	Gly/PHA
乙酸钠(SBR-1)	0	0.206	0.950	0.276	0.223	0.053	—	0.342	2.881	1.960
	60	0.010	0.156	0.672	0.390	0.282	—	4.549	0.272	7.101
丙酸钠(SBR-2)	0	0.040	0.460	0.343	—	0.124	0.219	0.618	2.006	3.437
	60	0.006	0.085	0.577	—	0.150	0.249	8.155	0.179	14.137

1) 表示厌氧初期系统内的 Poly-P 含量

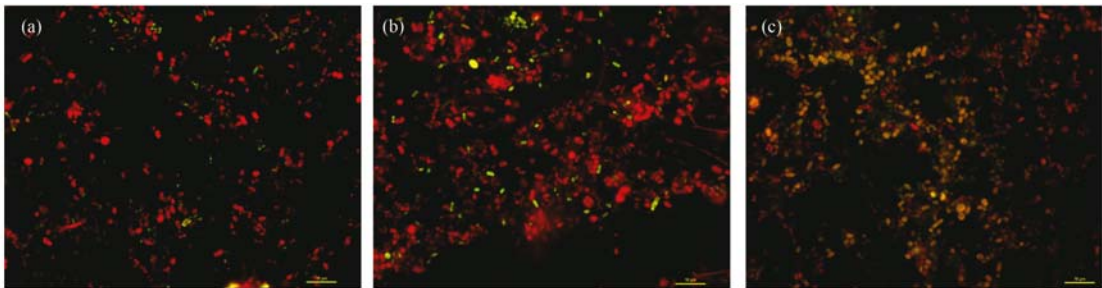


图 5 长期低 Poly-P 条件下 SBR-1 系统功能菌群的 FISH 图片

Fig. 5 FISH images of functional microbial population in SBR-1 in long-term Poly-P deficiency

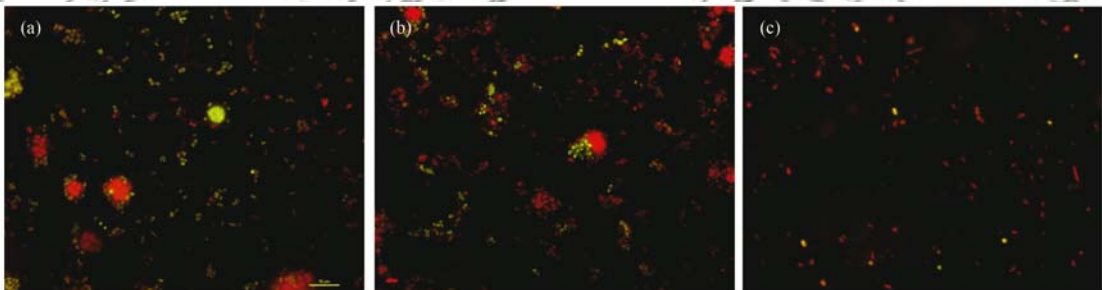


图 6 长期低 Poly-P 条件下 SBR-2 系统功能菌群的 FISH 图片

Fig. 6 FISH images of functional microbial population in SBR-2 in long-term Poly-P deficiency

FISH 的定量分析表明, 长期低 Poly-P 条件下 SBR-1 系统中 Acc. I、Acc. II 和 GAOs 的丰度分别为 $(12 \pm 3)\%$ 、 $(10 \pm 2)\%$ 和 $(35 \pm 5)\%$. 与 Poly-P 充足的原 EBPR 系统菌群相比(表 6), 长期低 Poly-P 条件下 SBR-1 系统中 Acc. I 和 Acc. II 丰度明显降低, GAOs 丰度大幅增加, 由原 EBPR 系统中的 $(8 \pm 3)\%$ 增长到 $(35 \pm 5)\%$. 然而 SBR-2 系统的菌群变化与 SBR-1 系统有很大不同. SBR-2 系统中 Acc. I 和 GAOs 的丰度基本保持不变[分别为 $(40 \pm 7)\%$ 和 $(3 \pm 2)\%$], 只有 Acc. II 数量明显降低 $(19\% \pm 3\%)$, 见表 6. 上述结果表明, 丙酸作为碳源更有利于 *Accumulibacter* 适应低磷负荷的运行环境, 且在低磷负荷的运行环境下 Acc. I 比 Acc. II 更具竞争优势.

表 6 长期低 Poly-P 条件下 EBPR 系统中 *Accumulibacter* 和 GAOs 的丰度/%

Table 6 Abundance of <i>Accumulibacter</i> and GAOs in EBPR System under long-term Poly-P deficiency/%				
项目	乙酸钠(SBR-1)		丙酸钠(SBR-2)	
	0 d	60 d	0 d	60 d
Acc. I	19 $\pm$ 5	12 $\pm$ 3	37 $\pm$ 11	40 $\pm$ 7
Acc. II	26 $\pm$ 13	10 $\pm$ 2	35 $\pm$ 4	19 $\pm$ 3
GAOs	8 $\pm$ 3	35 $\pm$ 5	2 $\pm$ 1	3 $\pm$ 2

在长期低 Poly-P 条件下 SBR-1 和 SBR-2 系统中的微生物菌群结构发生了很大变化. SBR-1 系统中 Acc. I 和 Acc. II 丰度减小, 而 GAOs 数量显著增加 $(35\% \pm 5\%)$. 本研究 SBR-1 系统的菌群变化与 Welles 等^[16] 的研究结果相似, 富含 Acc. II $(99\% \pm 6\%)$ 的活性污泥置于低磷的环境中 14 个

SRT 后, 形成了 Acc. II ($49\% \pm 6\%$) 和 GAOs ($46\% \pm 7\%$) 的混合菌群系统. 如果微生物根本不进行增殖, 那么在理想情况下, 只需要 1 个 SRT 就可以淘汰原菌群的 64% 以上, 3 个 SRT 时间就可以淘汰 95% 的原菌群^[16]. 而 SBR-1 系统中 *Accumulibacter* 丰度经过 5 个 SRT 只减少了约 50%, 并且从图 4 (a) 可以看出厌氧条件下液相中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量增加, 好氧条件下 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量减少. 这说明 SBR-1 系统中 *Accumulibacter* 在较低 Poly-P 条件下仍然参与了代谢. 只是对于 SBR-1 系统中表现出 GAM 特性的主体还不能确定, 有可能仅仅是 GAOs 主导了 GAM 的代谢方式, 也有可能是系统中 GAOs 和未被淘汰出系统的 *Accumulibacter* 共同作用的结果. 而 SBR-2 系统的菌群变化与 Acevedo 等^[14] 的研究相似, Acc. I 丰度基本保持不变 ($40\% \pm 7\%$), Acc. II 丰度降低, 并且 GAOs 丰度长期较低 ($3\% \pm 2\%$). 因此认为 SBR-2 系统中的 Acc. I 可以在长期低 Poly-P 条件下, 以 GAM 方式进行代谢并得以生存. 上述结果暗示了丙酸更适宜作为低磷负荷 EBPR 系统的碳源, 且 Acc. I 由于其较高的代谢活性可以在进水较低磷浓度条件下生存并成为优势菌群.

2.3 好氧加磷实验

为了验证长期低 Poly-P 条件下 *Accumulibacter* 是否仍然具有除磷能力, 在厌氧阶段结束时, 向 SBR-1 和 SBR-2 系统中投加 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 KH_2PO_4 溶液, 观察好氧阶段 *Accumulibacter* 对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的吸收能力 (图 7). 厌氧末期 (90 min) 投加等量的 KH_2PO_4 溶液, SBR-1 和 SBR-2 系统中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度分别为 $43.51 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $38.55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 在 130 min 和 150 min 时, 吸磷反应趋于停止, 两个系统中的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度几乎为零, 平均吸磷速率分别为 $64.72 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ (40 min) 和 $38.33 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ (60

min). 经过长期低 Poly-P 条件, SBR-1 和 SBR-2 系统的吸磷能力约是原 EBPR 系统的 1.36 和 1.15 倍. 虽然 SBR-1 系统中 *Accumulibacter* 的菌群数量减少了, 但未被淘汰的 *Accumulibacter* 对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 仍然具有较强的摄取能力, 表明了即使经历了长期的低聚磷条件, 系统内的 *Accumulibacter* 仍然具有较强的生物除磷能力.

3 结论

(1) 长期低 Poly-P 条件下乙酸系统中 Acc. I 和 Acc. II 丰度降低, GAOs 丰度显著增加 (由 $8\% \pm 3\%$ 增长到 $35\% \pm 5\%$); 而丙酸系统中 Acc. I 和 GAOs 的丰度基本保持不变, Acc. II 菌群数量下降. 这表明丙酸碳源更有利于 *Accumulibacter* 适应低磷负荷的运行环境, 且在低磷负荷的运行环境下 Acc. I 比 Acc. II 更具竞争优势.

(2) 长期低 Poly-P 条件下乙酸和丙酸系统菌群均表现出了 GAM 特征. 而在长期低 Poly-P 的环境中, 丙酸系统中 Acc. I 仍可以保持较高的丰度 ($40\% \pm 7\%$), 表明丙酸系统中 Acc. I 能够在长期低 Poly-P 条件下以一种不依赖 Poly-P 的 GAM 方式进行代谢, 从而得以生存.

(3) 经历了长期低 Poly-P 条件之后的 *Accumulibacter*, 尽管乙酸系统中 *Accumulibacter* 的菌群数量有所减少, 在恢复供给较高浓度磷酸盐后, 两个系统均表现出较好的生物除磷性能, 表明即使经历了长期低聚磷的不利条件, 系统内的 *Accumulibacter* 仍然具有较强的生物除磷能力.

参考文献:

- [1] Comeau Y, Hall K J, Hancock R E W, et al. Biochemical model for enhanced biological phosphorus removal [J]. Water Research, 1986, 20(12): 1511-1521.
- [2] Oehmen A, Yuan Z G, Blackall L L, et al. Comparison of acetate and propionate uptake by polyphosphate accumulating organisms and glycogen accumulating organisms [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2005, 91(2): 162-168.
- [3] Acevedo B, Borrás, L, Oehmen A, et al. Modelling the metabolic shift of polyphosphate-accumulating organisms [J]. Water Research, 2014, 65: 235-244.
- [4] Smolders G J F, Van der Meij J, Van Loosdrecht M C M, et al. Model of the anaerobic metabolism of the biological phosphorus removal process: Stoichiometry and pH influence [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1994, 43(6): 461-470.
- [5] Hesselmann R P X, von Rummell R, Resnick S M, et al. Anaerobic metabolism of bacteria performing enhanced biological phosphate removal [J]. Water Research, 2000, 34(14): 3487-3494.
- [6] Erdal U G, Erdal Z K, Daigger G T, et al. Is it PAO-GAO competition or metabolic shift in EBPR system? Evidence from an experimental study [J]. Water Science & Technology, 2008, 58(6): 1329-1334.

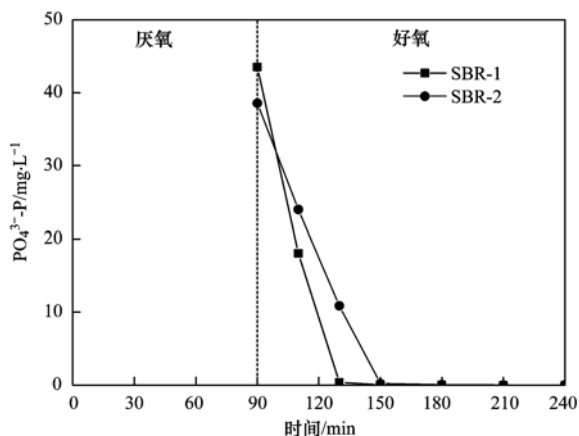


图 7 长期处于低磷环境的 *Accumulibacter* 对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的吸收

Fig. 7 Uptake of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ by *Accumulibacter* in long-term Poly-P deficiency

- [7] Acevedo B, Oehmen A, Carvalho G, *et al.* Metabolic shift of polyphosphate-accumulating organisms with different levels of polyphosphate storage [J]. *Water Research*, 2012, **46** (6): 1889-1900.
- [8] Welles L, Lopez-Vazquez C M, Hooijmans C M, *et al.* Impact of salinity on the anaerobic metabolism of phosphate-accumulating organisms (PAO) and glycogen-accumulating organisms (GAO) [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2014, **98** (17): 7609-7622.
- [9] Crocetti G R, Hugenholtz P, Bond P L, *et al.* Identification of polyphosphate-accumulating organisms and design of 16S rRNA-directed probes for their detection and quantitation [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2000, **66** (3): 1175-1182.
- [10] Kong Y H, Nielsen J L, Nielsen P H. Microautoradiographic study of *Rhodocyclus*-related polyphosphate-accumulating bacteria in full-scale enhanced biological phosphorus removal plants [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2004, **70** (9): 5383-5390.
- [11] He S, Gu A Z, McMahon K D. The role of *Rhodocyclus*-like organisms in biological phosphorus removal: factors influencing population structure and activity [J]. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2005, **2005** (14): 1999-2011.
- [12] Gonzalez-Gil G, Holliger C. Dynamics of microbial community structure of and enhanced biological phosphorus removal by aerobic granules cultivated on propionate or acetate [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2011, **77** (22): 8041-8051.
- [13] Crocetti G R, Banfield J F, Keller J, *et al.* Glycogen-accumulating organisms in laboratory-scale and full-scale wastewater treatment processes [J]. *Microbiology*, 2002, **148** (11): 3353-3364.
- [14] Acevedo B, Murguì 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.
- [15] Acevedo B, Camiña C, Corona J E, *et al.* The metabolic versatility of PAOs as an opportunity to obtain a highly P-enriched stream for further P-recovery [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, **270**: 459-467.
- [16] Welles L, Lopez-Vazquez C M, Hooijmans C M, *et al.* Prevalence of '*Candidatus Accumulibacter phosphatis*' type II under phosphate limiting conditions [J]. *Amb Express*, 2016, **6**: 44.
- [17] Zhou Y, Pijuan M, Zeng R J, *et al.* Could polyphosphate-accumulating organisms (PAOs) be glycogen-accumulating organisms (GAOs)? [J]. *Water Research*, 2008, **42** (10-11): 2361-2368.
- [18] Welles L, Tian W D, Saad S, *et al.* *Accumulibacter* clades Type I and II performing kinetically different glycogen-accumulating organisms metabolisms for anaerobic substrate uptake [J]. *Water Research*, 2015, **83**: 354-366.
- [19] 李冬, 曹美忠, 郭跃洲, 等. 不同磷浓度下生物除磷颗粒系统的 COD 需求 [J]. *环境科学*, 2018, **39** (7): 3247-3253.
- Li D, Cao M Z, Guo Y Z, *et al.* COD requirement for biological phosphorus removal granule system under different phosphorus concentrations [J]. *Environmental Science*, 2018, **39** (7): 3247-3253.
- [20] Liu W T, Nakamura K, Matsuo T, *et al.* Internal energy-based competition between polyphosphate-and glycogen-accumulating bacteria in biological phosphorus removal reactors—Effect of PC feeding ratio [J]. *Water Research*, 2015, **31** (6): 1430-1438.
- [21] Schuler A J, Jenkins D. Enhanced biological phosphorus removal from wastewater by biomass with different phosphorus contents, Part I: experimental results and comparison with metabolic models [J]. *Water Environment Research*, 2003, **75** (6): 485-498.
- [22] Tian W D, Lopez-Vazquez C M, Li W G, *et al.* Occurrence of PAOI in a low temperature EBPR system [J]. *Chemosphere*, 2013, **92** (10): 1314-1320.
- [23] Welles L, Abbas B, Sorokin D Y, *et al.* Metabolic response of "*Candidatus Accumulibacter Phosphatis*" clade II C to changes in influent P/C ratio [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016, **7**: 2121.
- [24] Fang W, Zhang P Y, Gou X Y, *et al.* Volatile fatty acid production from spent mushroom compost: effect of total solid content [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2016, **113**: 217-221.
- [25] Oehmen A, Keller-Lehmann B, Zeng R J, *et al.* Optimisation of poly- β -hydroxyalkanoate analysis using gas chromatography for enhanced biological phosphorus removal systems [J]. *Journal of Chromatography A*, 2005, **1070** (1-2): 131-136.

CONTENTS

Pollution Characteristics and Regional Transport of Atmospheric Particulate Matter in Beijing from October to November, 2016	ZHANG Han-yu, CHENG Shui-yuan, YAO Sen, <i>et al.</i> (1999)
Chemical Compositions, Mass Concentrations, and Emission Factors of Particulate Organic Matters Emitted from Catering	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, QIAO Li-ping (2010)
Size Distributions of Aerosol During the Summer at the Summit of Mountain Taishan (1534 m) in Central East China	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, YIN Yan, <i>et al.</i> (2019)
Concentration Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang	YAN Guang-xuan, ZHANG Pu-zhen, HUANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2027)
Scenario Analysis of PM _{2.5} Concentration Targets and Milestones in China	HE Jin-yu, YAN Li, WANG Yan-chao, <i>et al.</i> (2036)
PM _{2.5} Emission Characteristics and Estimation of Emission Reduction Potential from Typical Industrial Sources in Anyang	DU Xiao-shen, YAN Li, HE Jin-yu, <i>et al.</i> (2043)
Emission Characteristics and List of Inorganic Elements in Fine Particles of Typical Industrial Kilns in Zhengzhou City	ZHAO Qing-yan, HAN Shi-jie, ZHANG Yi-shun, <i>et al.</i> (2052)
Composition and Atmospheric Reactivity of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in the Urban Area of Nanjing, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (2062)
Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol of VOCs from Fossil Fuel Combustion in Lanzhou City	LIU Zhen, ZHU Yu-fan, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (2069)
Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees	LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, LI Qi, <i>et al.</i> (2078)
Ion Concentrations and Their Spatial Variability in Underground Water and Surface Water in Typical Terrestrial Ecosystems in China	HUANG Li, ZHANG Xin-yu, YUAN Guo-fu, <i>et al.</i> (2086)
Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments	LIU Xi, WANG Zhi, WANG Xue-lei, <i>et al.</i> (2094)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Bodies in Seven Basins of China	FAN Bo, WANG Xiao-nan, HUANG Yun, <i>et al.</i> (2101)
Occurrence, Input, and Seasonal Variations of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Rivers and Drain Outlets from the Dalian Coastal Area, China	CHEN Hong, HAN Jian-bo, ZHANG Can, <i>et al.</i> (2115)
Space-time Characteristics and Environmental Significance of Stable Isotopes in Precipitation at an Arid Inland River Basin	YUAN Rui-feng, LI Zong-xing, CAI Yu-qin, <i>et al.</i> (2122)
Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment	HUNAG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (2132)
Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2143)
Analysis of Transport and Transformation Characteristics Between Dissolved Phosphorus and Particulate Phosphorus in Water of the Three Gorges Reservoir	QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2152)
Vertical Distribution Profiles and Release Potential of Mainstream Column Sediments in the Three Gorges Reservoir After Impoundment to 175 m	LI Rui, PAN Chan-juan, TANG Xian-qi, <i>et al.</i> (2160)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in the Dongting Lake at Different Water Periods	LI Ying-jie, WANG Li-jing, LI Hong, <i>et al.</i> (2170)
Effects of Exogenous Carbon Addition on Equilibrium Phosphate Concentration and Risk of Phosphorus Release from Sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, DAI Yuan (2178)
Spatial Distribution of Organic Phosphorus in Sediment and Its Environmental Implication in the Upper Stream of Minjiang River	XU Jian, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2186)
Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed	JIANG Qian-wen, LIU Feng, PENG Ying-xiang, <i>et al.</i> (2194)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin	ZHANG Jie, GUO Xi-ya, ZENG Ye, <i>et al.</i> (2202)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in the Water of the Ruxi River Estuary, a Typical Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	MA Wei-bin, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2211)
Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland	LIU Wei-hao, WANG Yong-min, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (2219)
Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands	FAN Yu-fei, LIU Wei-hao, SUN Tao, <i>et al.</i> (2226)
Effects of Microplastics on Antibiotic Resistance Genes in Estuarine Sediments	HUANG Fu-yi, YANG Kai, ZHANG Zi-xing, <i>et al.</i> (2234)
Comparison and Source Apportionment of PAHs Pollution of Runoff from Roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai	WU Jie, XIONG Li-jun, WU Jian, <i>et al.</i> (2240)
Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China	WANG Zhen-fang, ZHANG Wei, YANG Li, <i>et al.</i> (2249)
Algal Bloom and Mechanism of Hypoxia in the Metalimnion of the Lijiahe Reservoir During Thermal Stratification	LIU Xue-qing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2258)
Allelopathic Effects and Allelochemicals of <i>Myriophyllum elatinoides</i> on <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Selenastrum capricornutum</i>	BI Ye-liang, WU Shi-min, ZHOU Si-ning, <i>et al.</i> (2265)
Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite	FU Zhi-xuan, GUO Ying-qing, CHU Wen-hai (2271)
Influencing Factors and Transformation Mechanism of Venlafaxine Degradation by UV	LÜ Juan, XU Zhi-wei, WANG Yan (2278)
Mechanism of Synergistic Adsorption of Arsenic and Cadmium by Aluminium-substituted Ferrihydrites	HUANG Bo, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (2287)
Fluoride Removal Efficiency of Novel Material: Magnetite Core/Zirconia Shell Nanocomposite	FANG Wen-can, LI Xiao-di, FANG Jing, <i>et al.</i> (2295)
Impact Mechanisms of Carboxyl Group Modified Cathode on Acetate Production in Microbial Electrosynthesis Systems	QI Jia-xin, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (2302)
Partial Nitrification and Denitrification of Low C/N Ratio Sewage Based on Zoning Oxygen and Dissolved Oxygen Control	WU Chun-lei, RONG Yi, LIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (2310)
Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations	MA Yan-hong, ZHAO Zhi-chao, AN Fang-jiao, <i>et al.</i> (2317)
Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15°C SBBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (2326)
Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of <i>Accumulibacter</i> in AO-SBR System	WANG Shao-po, LI Zhu, ZHAO Le-dan, <i>et al.</i> (2333)
Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics	YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, <i>et al.</i> (2341)
Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria	LIU Xiang-yang, ZHANG Qian, WU Heng, <i>et al.</i> (2349)
Effect of Different Temperatures on the Performance of Autotrophic Nitrogen Removal and Microbial Community from Swine Wastewater	HUANG Fang-yu, DENG Liang-wei, YANG Hong-nan, <i>et al.</i> (2357)
Characteristics and Regional Heterogeneity of Eukaryotic Microbial Community in Wastewater Treatment Plants	QIN Wen-tao, ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, <i>et al.</i> (2368)
Effects of Wetland Reclamation on Soil Microbial Community Structure in the Sanjiang Plain	WANG Na, GAO Jie, WEI Jing, <i>et al.</i> (2375)
Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes	LIU Jin-xian, LI Cui, LUO Zheng-ming, <i>et al.</i> (2382)
Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, WANG Cong, <i>et al.</i> (2394)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on CH ₄ Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, JIANG Chang-sheng, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (2404)
Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods	WANG Xiao-yun, CAI Huan-jie, LI Liang, <i>et al.</i> (2413)
Effects of Different Fertilization Modes on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Paddy Fields in Hot Areas	TIAN Wei, WU Yan-zheng, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (2426)
Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil	ZENG Man-man, CI En, FAN Jing-jing, <i>et al.</i> (2435)
Cd Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Paddy Soil in High Cadmium Anomaly Area of Guangxi	SONG Bo, WANG Fo-peng, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (2443)
Remediation Potential of <i>Ageratum conyzoides</i> L. on Cadmium Contaminated Farmland	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, BIN Juan, <i>et al.</i> (2453)
Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting <i>Lactuca sativa</i> L.	JIAO Hai-hua, GUO Jia-jia, ZHANG Jing-min, <i>et al.</i> (2460)
Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil	SHU Xin, LI Yan, LI Feng, <i>et al.</i> (2471)
Pollution Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Around a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant	LÜ Zhan-lu, ZHANG Jin-liang, LU Shao-you, <i>et al.</i> (2483)