

SRT 对酪蛋白水解物为碳源的 EPBR 系统的影响

任晨竹^{1,2}, 王少坡^{1,2}, 王丽杰³, 毕艳孟^{1,2}, 李亚静^{1,2}, 于静洁^{1,2}

(1. 天津城建大学环境与市政工程学院, 天津 300384; 2. 天津市水质科学与技术重点实验室, 天津 300384;
3. 长白山职业技术学院, 吉林白山 134300)

[摘要] 为了探究污泥龄(SRT)对以酪蛋白水解物(Cas aa)为唯一碳源的强化生物除磷(EPBR)系统性能的影响,采用序批式反应器(SBR),在低温条件下考察了 SRT 对 Cas aa 为碳源的 EPBR 中微生物菌群的变化及其污染物去除性能的影响。结果表明, SRT 为 15 d 时,系统除磷性能最佳,除磷率可达 95% 以上,显著高于其他 SRT 条件。系统运行典型周期分析表明:当 SRT 为 15 d 时,系统的厌氧释磷质量浓度最大,为 34.03 mg/L,好氧吸磷质量浓度最大,为 48.45 mg/L,除磷效果最优。高通量测序分析结果表明,系统内聚磷菌(PAOs)的组成和结构会随着 SRT 的变化而变化, SRT 为 15 d 时,系统内全体 PAOs 相对丰度最高。

[关键词] 污泥龄;酪蛋白水解物;强化生物除磷;聚磷菌

[中图分类号] X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2023)01-0056-06

Effect of SRT on EBPR system with sodium casein hydrolysate as carbon source

REN Chenzhu^{1,2}, WANG Shaopo^{1,2}, WANG Lijie³, BI Yanmeng^{1,2}, LI Yajing^{1,2}, YU Jingjie^{1,2}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;
2. Tianjin Key Laboratory of Aquatic Science and Technology, Tianjin 300384, China;
3. Changbaishan Vocational Technical College, Baishan 134300, China)

Abstract: In order to investigate the effect of sludge retention time(SRT) on the performance of biological phosphorus removal system, a sequential batch reactor(SBR) was used. In this system, sodium casein hydrolysate(Cas aa) was used as the only carbon source. At low temperature, the effects of SRT on the change of microbial community and the removal performance of organic matter were investigated. The results show that when the sludge retention time is 15 d, the system has the best phosphorus removal performance, and the phosphorus removal rate can reach more than 95%, which is significantly higher than other stages. The analysis of typical operation cycle of the system showed that when the sludge retention time was 15 d, the maximum anaerobic phosphorus release and aerobic phosphorus uptake of the system was 34.03 mg/L and 48.45 mg/L, respectively, and the phosphorus removal effect was the best. The results of high-throughput sequencing analysis showed that the composition and structure of polyphosphate accumulating organisms(PAOs) changed with the sludge retention time, and the relative abundance of all polyphosphate accumulating organisms was the highest when SRT was 15 d.

Key words: sludge retention time; sodium casein hydrolysate; enhanced biological phosphorus removal(EBPR); polyphosphate accumulating organisms(PAOs)

强化生物除磷(Enhanced biological phosphorus removal, EBPR)工艺通过厌氧和好氧的交替运行,在活性污泥系统中能够富集类聚磷微生物,通过好

氧末端排泥的方法达到污水除磷的目的^[1]。该工艺具有处理费用低、可持续运行等优点,在世界范围内被广泛接受并应用^[2]。以往研究表明,属于 Proteo-

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51678388)

bacteria(变形菌门)的 *Candidatus Accumulibacter*(假丝酵母菌)被认为是最重要的聚磷菌(PAOs)^[3]。可是,在许多其他的EBPR系统中,检测到高丰度存在的属于 Actinobacteria(放线菌门)的 *Tetrasphaera*(四球虫属),占细菌总生物量的30%^[4]。因此,在某些EBPR系统中, *Tetrasphaera* 可能是比 *Candidatus Accumulibacter* 更为重要的聚磷菌属。

Tetrasphaera 在厌氧条件下消耗氨基酸,随后在好氧条件下吸收磷^[5]。蛋白质是生活污水的主要成分(占有有机物的25%~35%)^[6],氨基酸是 *Tetrasphaera* 和许多其他细菌的重要底物^[7],而醋酸盐和丙酸盐则是 *Candidatus Accumulibacter* 的重要底物^[8]。然而,EBPR系统的所有代谢模型都是基于醋酸盐和葡萄糖^[6]开发的,不包括氨基酸的使用。实际上,在厌氧好氧条件下的EBPR系统中添加某些氨基酸后,已经观察到典型的释磷和吸磷过程,但是其贮藏产物和代谢途径仍然未知。

酪蛋白水解物(Cas aa)水解后的主要成分是氨基酸和小肽,而氨基酸是 *Tetrasphaera* 的重要底物,已有研究表明利用 Cas aa 作碳源可以促进 *Tetrasphaera* 的富集^[9]。然而,目前针对以 Cas aa 为碳源的研究较少,也限制了对于生物除磷系统过程的深入了解。本研究以 Cas aa 为唯一碳源,富集培养 PAOs,并探讨不同污泥龄(SRT)条件下EBPR的处理效能,考察系统中的菌群结构及其变化,以期EBPR工艺的稳运行提供参考。

1 材料和方法

1.1 实验装置

实验装置见图1。

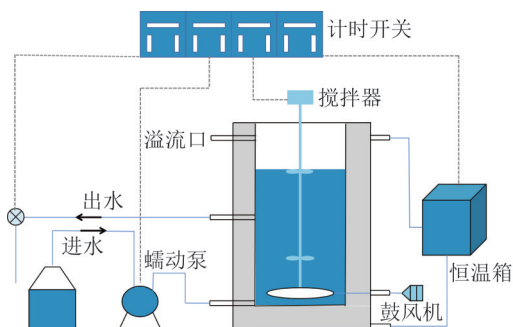


图1 实验装置

Fig. 1 The schematic diagram of the SBR used in this study

采用总容积为15 L,有效容积为12 L的SBR反

应装置。反应器主体由双层有机玻璃制成,内层为反应区,外层为保温区。采用底部进水、中部出水的方式,辅以蠕动泵和电磁阀实现自动进出水,上部设有溢流口,内置电动搅拌器保证反应混合均匀。

1.2 种泥及进水水质

本研究中,种泥采用贮存于4℃冰箱中的厌氧-好氧序批式反应器(AO-SBR)污泥,颜色呈褐色,反应器初始污泥质量浓度为2 500 mg/L左右,闷曝72 h,使其恢复活性。

反应器进水采用人工合成废水,具体成分为: COD(Cas aa)300 mg/L, P(K_2HPO_4 、 KH_2PO_4)15 mg/L, N(NH_4Cl)15 mg/L, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 118 mg/L, $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ 56 mg/L, ATU(烯丙基硫脲)14 mg/L, $NaHCO_3$ 167 mg/L, 微量元素0.5 mL/L。每L微量元素溶液包括: KI 0.18 g、 H_3BO_3 0.15 g、 $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ 0.15 g、 $MnCl_2 \cdot 4H_2O$ 0.12 g、 $Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$ 0.06 g、 $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.12 g、 $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 0.03 g、 $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ 1.50 g 和 EDTA 10.00 g^[10]。

1.3 实验方法

在本研究中,采用配有机机械搅拌器的SBR来研究SRT对EBPR的影响。反应器每天运行4周期,每个周期包括进水阶段(10 min)、厌氧阶段(120 min)、好氧阶段(150 min)、沉淀阶段(70 min)、出水阶段(10 min)。好氧段采用气泵供气,通过气体流量计调节曝气量,好氧阶段末期DO约为7.0 mg/L。反应器每周进水6 L,充水比为50%,1 d内反应器进水总体积为24 L,水力停留时间(HRT)为12 h。通过在每日第一周期好氧阶段末期排泥,将系统运行分为3个阶段,第1阶段SRT为15 d(1~80 d),排泥量为800 mL;第2阶段SRT为20 d(81~140 d),排泥量为600 mL;第3阶段SRT为10 d(141~170 d),排泥量为1 200 mL。3个阶段除SRT不同外,其余参数均保持一致。在系统整个运行期间,采用恒温槽将温度控制在 $(15 \pm 1)^\circ C$,投加 $NaHCO_3$ 控制进水pH为7.4。

1.4 分析方法

磷酸盐(PO_4^{3-})采用钼锑抗分光光度法测定; COD采用15 min快速消解法测定; MLSS和MLVSS采用重量法测定。糖原(Gly)测定方法根据A. OEHMEN等^[11]所述进行了修改,取一定量的冻干泥样,然后加入5 mL 0.6 mol/L HCl溶液后,在100℃下消化5 h。多聚磷酸盐(Poly-P)的含量根据总磷

(TP)和MLVSS计算^[12]。使用DO和pH探头测量DO、pH及温度(Multi 340i,德国WTW公司)。采用16S rRNA基因测序法进行菌群鉴定^[13]。

2 结果和讨论

2.1 EBPR系统 PO_4^{3-} 及COD去除性能

反应器以Cas aa为唯一有机碳源,进水 PO_4^{3-} 和COD分别为 (15 ± 1) mg/L和 (300 ± 10) mg/L,在 (15 ± 1) °C的条件下运行170 d,考察系统运行的3个不同阶段内 PO_4^{3-} 及COD的浓度变化,结果见图2。

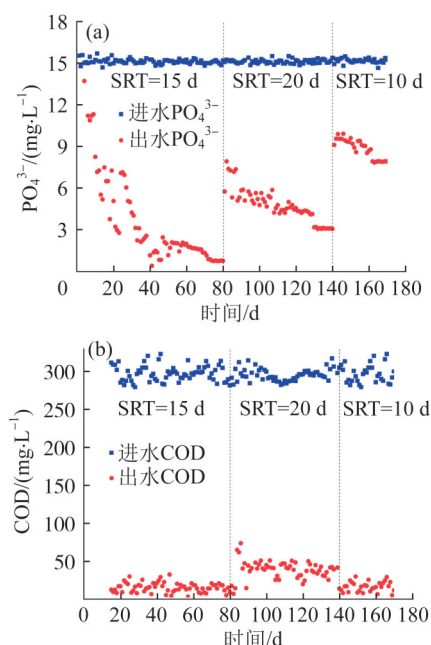


图2 不同运行参数下EBPR系统 PO_4^{3-} 和COD浓度随时间的变化

Fig. 2 Change of PO_4^{3-} and COD concentration with time in EBPR system under different operating parameters

由图2(a)可知,在SRT=15 d的条件下运行80 d,反应器运行初期出水 PO_4^{3-} 变化较大,从13.66 mg/L下降为1.10 mg/L,随后系统运行达到稳定,出水 PO_4^{3-} 为0.71 mg/L;当调整SRT=20 d时,出水 PO_4^{3-} 增加到5.70 mg/L,随后系统运行达到稳定状态,出水平均 PO_4^{3-} 维持在3.01 mg/L,SRT延长可能会使污泥老化,污泥更新缓慢,不利于PAOs充分发挥其除磷能力,所以改变SRT后系统除磷性能变差;在SRT=10 d的条件下,系统运行稳定期出水平均 PO_4^{3-} 为7.86 mg/L,当SRT较短时,系统便具有低浓度的活性污泥,结合高通量测序结果表明,该阶段PAOs

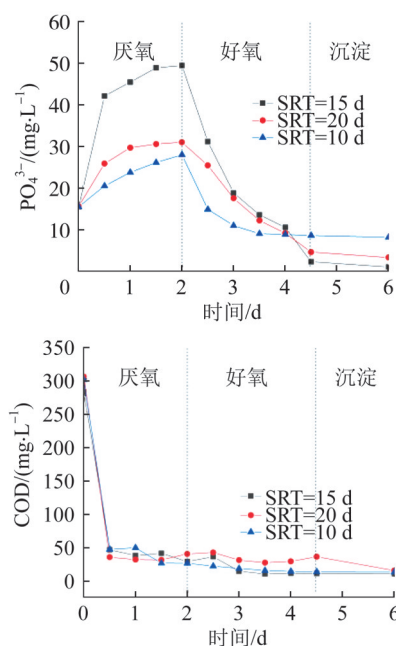
急剧减少,使得系统除磷性能继续恶化。以上结果表明,EBPR系统在SRT为15 d的条件下稳定运行时,除磷效果最佳。

由图2(b)可知,SRT=15 d时,系统出水COD无明显变化,均小于10 mg/L;调整SRT=20 d时,系统运行前2 d出水COD提高到65 mg/L,随着运行时间的增加,出水COD又趋于稳定,最终出水COD小于40 mg/L;继续调整SRT=10 d,系统运行稳定时出水COD均小于30 mg/L。图中数据表明,当延长SRT时,系统出水COD有所提高,这可能是因为一方面SRT变长,排泥量减少,生物新陈代谢产生的物质和死亡细胞产生的难以分解的部分难以随剩余污泥排出反应器,使得反应器中有机物质含量提高;另一方面SRT变长,污泥浓度升高,污泥负荷降低,营养物质不足引起内源代谢加剧,产生更多的内源代谢物,这部分物质随水排出,导致出水COD略有提高。但各阶段运行稳定时出水COD均小于50 mg/L,说明在以Cas aa为唯一碳源的EBPR系统中,SRT的改变对微生物吸收和利用碳源的影响不大。

2.2 EBPR系统典型周期 PO_4^{3-} 及COD浓度变化

在反应器运行稳定的条件下,从3个阶段各选取一个典型周期进行分析,分别选第80天(第1阶段)、第140天(第2阶段)和第170天(第3阶段)的第2个周期作为典型周期,分析系统中 PO_4^{3-} 和COD的浓度变化,结果见图3。

由图3可知,系统典型周期的生物除磷能力受SRT的影响较大。反应器SRT分别为15、20、10 d时,典型周期内厌氧阶段末期释磷质量浓度由最初的34.03 mg/L降低到15.40 mg/L然后下降为12.51 mg/L,单位VSS比释磷速率由最初的0.24 mmol/(g·h)(以P计,下同)降到0.14 mmol/(g·h),最后下降为0.08 mmol/(g·h)。在好氧阶段,典型周期内好氧吸磷质量浓度由最初的48.45 mg/L降到27.72 mg/L然后下降为19.84 mg/L,PAOs快速吸收了系统中绝大多数的磷,表现出良好的吸磷性能;SRT=15 d时,厌氧-好氧除磷能力较好,系统出水 PO_4^{3-} 浓度最低;SRT提高到20 d时,厌氧释磷量减少,系统在好氧条件下PAOs吸磷速率较慢,系统出水 PO_4^{3-} 达到4.32 mg/L,系统的除磷能力变差;SRT=10 d时,系统对 PO_4^{3-} 的去除效果最差。较短的SRT意味着每天排

图3 系统典型周期 PO_4^{3-} 浓度和 COD 随时间的变化Fig. 3 Changes of PO_4^{3-} and COD concentration with time in typical cycle of the system

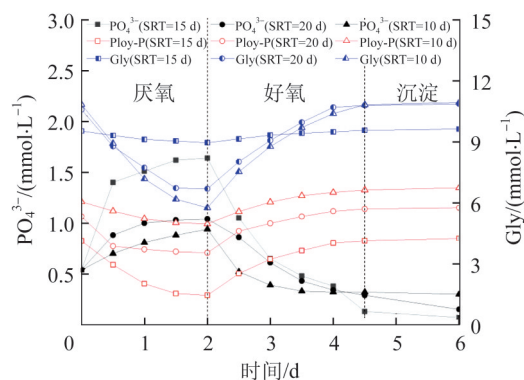
出的剩余污泥量较多,这会使活性污泥中的 PAOs 随着时间的增长而越来越少,从而造成厌氧释磷量降低,吸磷能量减少,因此合理控制 SRT 对于 EBPR 系统保持良好的除磷性能很重要;同时,过度延长 SRT 会使系统内其他异养菌大量增殖,例如聚糖菌^[14],其争夺营养物质的能力要强于聚磷微生物,系统中 PAOs 逐渐被取代,在一定程度上降低了除磷能力。

不同阶段的最终系统出水 COD 均小于 50 mg/L,能够达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中一级 A 的排放标准。系统对 COD 的去除率始终能维持在 85% 以上,说明 SRT 的变化对 COD 的去除不会产生太大的影响,此 SBR 反应器中是一个复杂的活性污泥微生态系统, COD 在不同 SRT 运行阶段都能被各种微生物吸收降解,因而能实现较高的去除效率。

2.3 EBPR 系统典型周期内物质随时间的变化

厌氧阶段 PAOs 降解 Ploy-P 和 Gly, 释放 PO_4^{3-} 进入水体,同时为微生物摄取碳源提供能量,随后在好氧阶段,又重新合成 Ploy-P 和 Gly。这符合强化生物除磷的代谢模式^[15]。考察反应器运行的 3 个阶段典型周期内 PO_4^{3-} 、Ploy-P 和 Gly 的浓度变化,结果

见图 4。

图4 系统典型周期内 PO_4^{3-} 、Ploy-P 和 Gly 的浓度变化Fig. 4 The concentration changes of PO_4^{3-} 、Ploy-P and Gly during the typical period of the system

由图 4 可知,当 SRT=15 d 时,系统中 Ploy-P 水解量为 0.54 mmol/L, Gly 分解量为 0.57 mmol/L (以 C 计);当 SRT=20 d 时, Ploy-P 水解量为 0.36 mmol/L, Gly 分解量为 3.90 mmol/L;当 SRT=10 d 时, Ploy-P 水解量为 0.22 mmol/L, Gly 分解量为 5.09 mmol/L。说明系统中微生物摄取碳源消耗的能量由 Ploy-P 水解和 Gly 分解来提供,随着有机碳源的减少,污水中的 PO_4^{3-} 浓度逐渐升高,完成厌氧释磷这一过程。在随后的好氧阶段,污泥样品中 Ploy-P 和 Gly 逐渐累积,系统表现出好氧过量吸磷的特性,从而实现从污水中除磷的目的。分析认为,当 SRT 从 15 d 延长为 20 d 时,系统中污泥停留时间偏长,强化了菌群的内源呼吸过程,这可能导致了 PAOs 释磷活性降低,从而 Ploy-P 水解量减少;另一方面,长 SRT 下系统排放的剩余污泥量减少,也导致了从系统排出的磷量减少,即系统除磷效率降低;调整 SRT 为 10 d 后,由于排放大量剩余污泥,使得系统中微生物量流失, PAOs 数量减少,厌氧释磷遭到抑制,系统除磷性能恶化变差。因此,系统在 SRT=15 d 时,对于该系统内的 PAOs 生长和代谢较为适宜,除磷性能也较好。

2.4 微生物群落结构分析

采用 16S rRNA 高通量测序平台对 EBPR 系统中微生物多样性进行分析。在门的生物学分类水平上将样品序列进行分类。在整个系统的运行期间,一共鉴定出 20 个菌门。其中, SRT 分别为 15、20、10 d 时分别鉴定出 19、17、17 个菌门。3 个阶段稳定期在门生物学水平上的微生物群落结构见图 5。

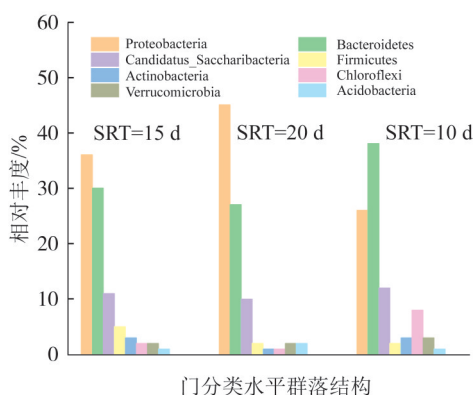


图5 系统 SRT 分别为 15、20、10 d 时污泥中微生物在门分类水平的群落结构

Fig. 5 Microbial community structure at phylum classification level in sludge with system SRT=15、20 and 10 days

由图 5 可知,整个系统中 Proteobacteria(变形菌门)、Bacteroidetes(拟杆菌门)、Candidatus_Saccharibacteria 为主要的菌门。SRT=15 d 时,Proteobacteria 占该阶段总的细菌数量的 36%,为优势菌门,此外, Bacteroidetes、Candidatus_Saccharibacteria 分别占总量的 30% 和 11%,也属于优势菌门;SRT=20 d 时,优势菌门也是 Proteobacteria,占该阶段总量的 45%,此外优势菌门也包括 Bacteroidetes 和 Candidatus_Saccharibacteria;这就说明当 SRT 分别为 15、20 d 时,污泥中的优势菌门类型一致,只是各菌门所占比不同。当 SRT=10 d 时,优势菌门与前两阶段略有不同, Bacteroidetes 的相对丰度最高,占该阶段细菌总数的 38%。

变形菌门(Proteobacteria)是目前已知细菌中最大的一门,该门下的细菌大多都是既能进行呼吸代谢,又能进行发酵代谢的兼性异养菌,它们以有机物为碳源,是 COD 降解的主要参与者,这与之前的 COD 变化图一致。拟杆菌门(Bacteroidetes)是革兰氏阴性的厌氧菌,其通常作为水体粪便污染的指示细菌,拟杆菌门在分解大分子方面具有重要意义。

在系统运行的 3 个阶段,污泥样品中共检测出 10 种除磷功能菌属,其相对丰度对比见图 6。这 10 个属的 PAOs 在 3 个阶段的分布情况:阶段 1 有 10 种、阶段 2 有 10 种、阶段 3 有 9 种。

由图 6 可知,该系统的除磷菌属分别是 *Rhodocyclus*(红环菌属)、*Tetrasphaera*(四球虫属)、*Aeromonas*(气单胞菌属)、*Brevundimonas*(短波单胞菌属)、*Dechloromonas*(脱氯单胞菌属)、*Pseudomonas*(假单

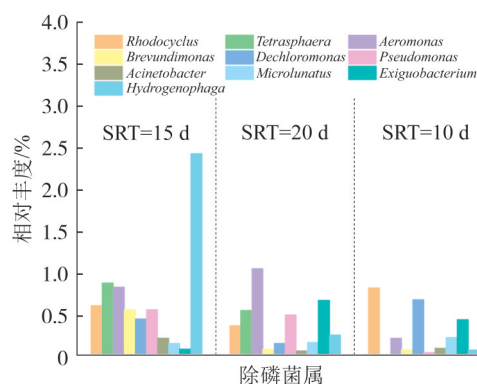


图6 不同阶段污泥中除磷功能菌属相对丰度对比

Fig. 6 Comparison of the relative abundance of PAOs in sludge at different stages

胞菌属)、*Acinetobacter*(不动杆菌属)、*Microlunatus*(小月菌属)、*Exiguobacterium*(微小杆菌属)和 *Hydrogenophaga*(氢噬菌属)。由图 6 还可知, *Rhodocyclus* 在系统运行期间变化较小,呈现先降低后升高的趋势,在 SRT=10 d 时,其相对丰度最大(8%),说明该菌属更适合短 SRT 系统;污泥中还检测到 *Tetrasphaera*,其相对丰度从第 1 阶段 0.86% 下降到第 2 阶段的 0.53%,继而在第 3 阶段出现短暂的消失,由于该菌属的代谢机制仍未揭示,在本系统呈现的不规律变化还有待深究;*Aeromonas* 的相对丰度在 3 个阶段中先上升再下降,当 SRT=20 d 时,其相对丰度达到最大,为 1.03%,说明该均属的世代周期较长。研究结果表明,第 1 阶段中除磷功能菌属总相对丰度最大,相应地,该阶段系统除磷性能也最好。

3 结论

(1)在低温(15 °C)、以酪蛋白为碳源的 EBPR 系统中,当 SRT 为 15 d 时,系统的除磷性能最优,除磷率可达 95%;但是 SRT 的长短并没有影响微生物对有机物的去除,COD 的去除率可达 98%;

(2)在低温(15 °C)、以酪蛋白水解物为碳源的 EBPR 系统中,当 SRT 为 15 d 时,系统的厌氧释磷质量浓度最大,为 34.03 mg/L,好氧吸磷质量浓度也是最大,为 48.45 mg/L,除磷效果最优;

(3)在本系统中,当 SRT=15 d 时,系统的生物多样性最高,PAOs 总体相对丰度最高,该系统的优势菌门为 Proteobacteria,优势菌属为 *Hydrogenophaga*。

参考文献

- [1] IZADI P, IZADI P, ELDYASTI A, et al. A review of biochemical diversity and metabolic modeling of EBPR process under specific environmental conditions and carbon source availability [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 288: 112362.
- [2] 刘有华,王思婷,杨乔乔,等. 国内外水体富营养化现状及聚磷菌研究进展[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(9): 26-35.
LIU Youhua, WANG Siting, YANG Qiaqiao, et al. Current situation of eutrophication of water body at home and abroad and research progress of phosphate accumulating bacteria [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(9): 26-35.
- [3] MIELCZAREK A T. Population dynamics of bacteria involved in enhanced biological phosphorus removal in Danish wastewater treatment plants [J]. Water Research, 2013, 47(4): 1529-1544.
- [4] 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.
- [5] 郝晓地,陈峤,刘然彬. *Tetrasphaera* 聚磷菌研究进展及其除磷能力辨析[J]. 环境科学学报, 2020, 40(3): 741-753.
HAO Xiaodi, CHEN Qiao, LIU Ranbin. Research advances of *Tetrasphaera* as polyphosphate accumulating organisms and analysis on their P-removal potential [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(3): 741-753.
- [6] KRISTIANSEN R, NGUYEN H T T, SAUNDERS A M, et al. A metabolic model for members of the genus *Tetrasphaera* involved in enhanced biological phosphorus removal [J]. The ISME Journal, 2013, 7(3): 543-554.
- [7] SANTOS M M, LEMOS P C, REIS M A, et al. Glucose metabolism and kinetics of phosphorus removal by the fermentative bacterium *Microthrix phosphovorus* [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999, 65(9): 3920-3928.
- [8] 徐立杰,郭春艳,彭永臻,等. 强化生物除磷系统的微生物学及生化特性研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2011, 17(3): 427-434.
XU Lijie, GUO Chunyan, PENG Yongzhen, et al. Review on the microbiological and biochemical characteristics of enhanced biological phosphorus removal system [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2011, 17(3): 427-434.
- [9] 杨鹤,王少坡,张铁凡,等. 酪蛋白水解物碳源 SBR 生物除磷系统启动[J]. 工业水处理, 2021, 41(2): 52-57.
YANG He, WANG Shaopo, ZHANG Tiefan, et al. Start-up of sodium casein hydrolysate carbon source SBR biological phosphorus removal system [J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(2): 52-57.
- [10] SMOLDERS G J, VAN DER MEIJ J, VAN LOOSDRECHT M C, 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.
- [11] OEHMEN A, YUAN Z, BLACKALL L L, et al. Short-term effects of carbon source on the competition of polyphosphate accumulating organisms and glycogen accumulating organisms [J]. Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2004, 50(10): 139-144.
- [12] ACEVEDO B, CAMIA C, CORONA J E. 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.
- [13] 张华,马涛,李丽,等. 生物除磷工艺中高效聚磷菌的快速筛选和鉴定[J]. 安徽建筑大学学报, 2020, 28(1): 69-72.
ZHANG Hua, MA Tao, LI Li, et al. Rapid screening and identification of efficient phosphorus accumulating organisms in biological phosphorus removal process [J]. Journal of Anhui Jianzhu University, 2020, 28(1): 69-72.
- [14] 许秀红,李秀,李绍峰,等. 强化生物除磷系统中聚磷菌和聚糖菌的竞争研究进展[J]. 化学工程师, 2017, 31(1): 44-48.
XU Xiuhong, LI Xiu, LI Shaofeng, et al. Research development on the competition between PAO and GAO in enhanced biological phosphorus removal system [J]. Chemical Engineer, 2017, 31(1): 44-48.
- [15] ROY S, GUANGLEI Q, ZUNIGA-MONTANEZ R. Recent advances in understanding the ecophysiology of enhanced biological phosphorus removal [J]. Current Opinion in Biotechnology, 2021, 67: 166-174.

[作者简介] 任晨竹(1996—), 硕士。电话: 18222880995, E-mail: 1576295702@qq.com。通讯作者: 王少坡, 教授。电话: 13920432636, E-mail: wspfr@sina.com。

[收稿日期] 2022-11-11(修改稿)