

论述与研究

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.05.001

厌氧/好氧交替生物膜工艺利用原水中碳源回收磷

丁鑫^{1,2}, 李祥^{1,2}, 毕贞^{1,2}, 黄勇^{1,2}, 刘缘^{1,2}

(1. 苏州科技大学 环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215009; 2. 苏州科技大学 环境生物技术研究所, 江苏 苏州 215009)

摘要: 厌氧段外加碳源刺激释磷一直是生物膜磷回收系统的必要措施,而我国城市污水中普遍含有200~300 mg/L的COD,充分利用城市污水中的碳源同时能提高磷回收效果的新工艺和新模式研发仍尤为重要。构建了“先厌氧再好氧”的循环运行模式,在悬浮填料生物膜工艺中开展利用原水有机碳源进行磷去除与富集的可行性研究。在生物膜培养过程中,控制有机负荷为0.25 kg/(kgMLSS·d),单周期为48 h,厌氧/好氧交替各4 h,充水比为25%,以悬浮填料为载体的聚磷生物膜可在30 d内形成;利用原水中碳源进行生物膜磷回收是可行的,出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 可稳定在0.5 mg/L以下,磷回收液浓度稳定在50~60 mg/L之间,最高可达60 mg/L。高通量测序结果显示,在门水平上 *Proteobacteria* 占主导地位,丰度由38.5%增至66.4%;在属水平上 *Candidatus_Competibacter* 由3.4%增至28.1%,*Deftuicoccus* 由2.6%增至7.5%,功能聚磷菌为 *Pseudomonas*,占比为2.9%。

关键词: 城市污水; 生物膜; 厌氧/好氧交替; 磷回收; 碳源

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)05-0001-08

Recovery of Phosphorus by Anaerobic/Aerobic Alternative Biofilm Process Using Organic Carbon from Raw Wastewater

DING Xin^{1,2}, LI Xiang^{1,2}, BI Zhen^{1,2}, HUANG Yong^{1,2}, LIU Yuan^{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)

Abstract: In the anaerobic stage, addition of carbon source to stimulate phosphorus release has always been a necessary measure for biofilm phosphorus recovery system. However, the carbon source of 200–300 mg/L is generally contained in urban sewage in China, so it is particularly important to develop new processes and models that can make full use of carbon source in sewage and improve phosphorus recovery effect. In this study, anaerobic/aerobic cycle operation mode was carried out, and the feasibility of phosphorus removal and enrichment by using organic carbon source from raw wastewater in suspended carrier biofilm process was investigated. When the organic loading was 0.25 kg/(kgMLSS·d), the single cycle was 48 h, the anaerobic/aerobic alternate was 4 h respectively, and the water-filling ratio was 25% in the process of biofilm cultivation, the phosphorus-accumulating biofilm with suspended filler could be formed within 30 days. It was feasible to recover phosphorus from biofilm by using carbon source in raw

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51938010)

通信作者: 黄勇 E-mail: yhuang_sz@sina.com

water, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ in effluent could be stabilized below 0.5 mg/L, and the concentration of phosphorus recovery solution was stabilized between 50 mg/L and 60 mg/L, with the highest value reaching 60 mg/L. High-throughput sequencing indicated that *Proteobacteria* at the phylum level was dominant, and the abundance increased from 38.5% to 66.4%; at the genus level, *Candidatus_Competibacter* increased from 3.4% to 28.1%, *Defluviicoccus* increased from 2.6% to 7.5%, and *Pseudomonas* was the functional phosphorus-accumulating bacterium, accounting for 2.9%.

Key words: municipal wastewater; biofilm; anaerobic/aerobic alternation; phosphorus recovery; carbon source

磷是一种不可再生的稀缺资源^[1-2]。近年来,从各种废物中回收磷技术的研发越来越引起关注。据估算,城市污水中的磷含量能满足人类15%~20%的磷需求^[3],而现阶段国内外城市污水厂磷回收项目主要以强化生物除磷(EBPR)侧流产生的剩余污泥为对象,从污泥浓缩发酵上清液及脱水滤液中回收磷^[4]。尽管该磷回收工艺已应用多年,但其回收效率普遍依赖于化学药剂的投加^[5-6],且存在回收工艺复杂、污泥产量大、处理成本高等问题^[7]。

为降低处理成本,减少能源消耗,生物膜磷回收系统逐步受到学者关注,即利用聚磷生物膜交替暴露于好氧/厌氧环境中,在好氧条件下将磷从水相转移至生物膜,在厌氧条件下引入添加碳源的回收液接纳生物膜释磷。在一个回收周期内,生物膜反应器依此反复进行好氧-厌氧交替运行,而回收液被重复使用,直至其中的磷浓度达到预期要求^[8-10]。Zhang等^[11]发现,当厌氧段向磷回收液中添加200 mg/L的COD时,可实现磷的高倍富集。但是额外使用碳源将会加大运行成本及碳排放。而我国城市污水中的COD普遍在200 mg/L左右,将这些碳源在该系统进行原位利用,直接去除、富集磷是最为经济的选择。为此,以成熟的聚磷生物膜为载体,构建一种新的模式:先厌氧再好氧,即先利用原水碳源进行厌氧释磷,再经历好氧段吸磷,同步实现磷的去除与富集,并考察了系统运行过程中微生物群落特征与磷去除和富集效果的相关性。

1 材料与方法

1.1 实验装置与运行模式

研究分为两个阶段:以悬浮填料为载体的聚磷生物膜培养阶段和以聚磷生物膜为核心的磷去除与富集阶段,设计两组实验装置,具体见图1。

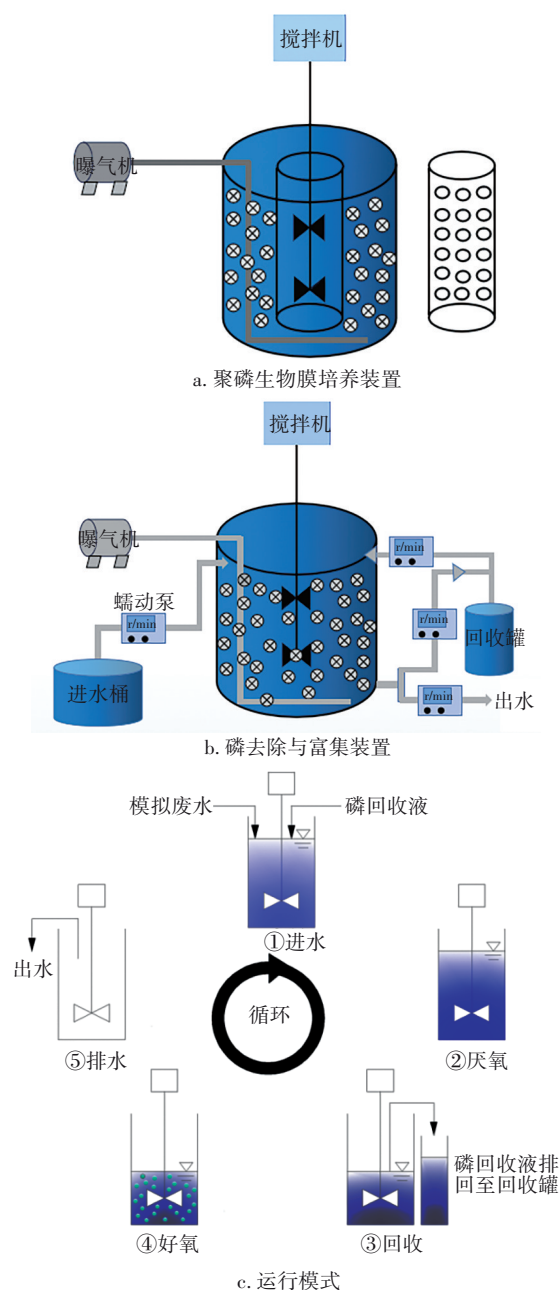


图1 实验装置及运行模式示意

Fig.1 Schematic diagram of operation process

生物膜培养装置由反应器、曝气机、搅拌机等组成。其中,反应器由有机玻璃制成,总高为250 mm,内径为190 mm,有效体积为5 L;反应器内置套筒(高为250 mm、内径为64 mm),表面镂空,搅拌机控制桨片在其内部进行搅拌,在均化水质的同时促进微生物的附着生长;套筒外填装悬浮填料(K1和K2,填充率为40%),外置曝气机为好氧段供氧,由定时器控制各装置开关。该阶段在好氧末端每48 h进行人工换水,充水比为25%。

在磷去除与富集阶段利用上述装置作为生物膜反应器的核心处理模拟废水,去除套筒,另配有进水桶、回收罐、蠕动泵等装置,见图1(b)。在该阶段生物膜反应器采用厌氧/好氧交替运行,运行前向反应器内泵入1.67 L模拟废水,先进行3 h的厌氧释磷,结束后将这部分厌氧释磷溶液泵入回收罐获得首批低浓度磷回收液;接着按图1(c)所示的模式运行,即按体积比为2:1同时泵入模拟废水(3.33 L)和磷回收液(1.67 L),利用废水中的有机碳源进行厌氧释磷后,向回收罐泵回等体积磷回收液;好氧段采用曝气机曝气,反应器内剩余含磷溶液经吸磷后全部排出;多次循环后磷回收液中磷浓度不断提高,进而得到富磷溶液。

1.2 原水水质

生物膜培养、磷去除与富集两个阶段均采用人工配水,COD、 NH_4^+-N 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 分别为6 000、300、60 mg/L和300、10、5 mg/L,另加有少量微量元素^[12],即 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 为90 mg/L、 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 为14 mg/L。

1.3 运行条件

生物膜培养阶段的接种污泥取自苏州市高新区某污水处理厂的氧化沟,MLSS在3 g/L左右。共培养30 d,分为泥膜共存期(0~15 d)和膜培养期(16~30 d);厌氧/好氧循环交替运行,循环周期为8 h(厌氧4 h、好氧4 h),有机负荷为0.25 kg/(kgMLSS·d),DO为3 mg/L,pH控制在7±0.2,温度为室温,每48 h在好氧末端后人工换水,充水比为25%。

在磷去除与富集阶段,生物膜反应器以厌氧/好氧交替运行,水力停留时间为8 h(厌氧3 h、好氧5 h),模拟废水与磷回收液体积比为2:1,pH为7±0.2,DO为6 mg/L,温度为室温。

1.4 分析项目及方法

1.4.1 水质指标分析方法

COD:快速消解法; $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$:钼锑抗分光光度

法; NH_4^+-N :纳氏试剂分光光度法;DO:Inlab OXI7300溶氧仪;pH:Inlab OXI7300 pH计;ORP:HQ14D ORP测定仪。

1.4.2 生物膜样品分析方法

胞外聚合物(EPS)参与了生物膜的形成并维持膜与填料间的机械稳定性,为了表征悬浮填料聚磷生物膜的黏附性能,选取接种污泥及生物膜培养阶段第30天的填料进行EPS提取及测定。即将清洗过的填料置于低速搅拌下进行生物膜剥离,得到生物膜混合溶液;将所得溶液均分为两份,一份用于测定MLVSS,另一份用于提取和测定EPS,方法见文献[13],其中蛋白质(PN)和多糖(PS)分别采用BCA试剂法和硫酸-苯酚法测定。为了进一步确定生物膜的形成,对培养第1天和第30天的悬浮填料进行厚度测量,多次测量取平均值,生物膜厚度为30 d测量平均值与1 d测量平均值之差,具体操作见文献[14]。

1.4.3 微生物群落组成分析

利用高通量测序技术对接种污泥和聚磷生物膜内部群落组成进行分析。具体操作为:刮取清洗过的生物膜样,于-80℃下保存,而后统一送由上海美吉生物医药科技有限公司进行测序。其中,PCR扩增采用细菌16S rDNA的V3-V4区通用引物338F(ACTCCTACGGGAGGCAGCAG)和806R(GGAC-TACHVGGGTWTCTAAT)^[11]。

2 结果与讨论

2.1 生物膜的形成

生物膜培养阶段采用前期不排泥、后期排泥的方式进行挂膜,培养30 d,填料上生物膜生长均匀,且膜厚度可达121.2 μm。在生物膜系统中,当生物膜厚度为40~120 μm时,即确定为挂膜成功^[15-16]。EPS参与了生物膜的形成并维持其稳定性,具有复杂的化学成分,其中多糖(PS)和蛋白质(PN)是最重要的组分。反应器自接种后,生物膜中EPS总量增加至118.21 mg/gVSS,蛋白质和多糖含量由接种污泥的19.23、6.86 mg/gVSS分别增至48.25、69.96 mg/gVSS,这表明悬浮填料上生物膜表面的黏附性增强。

在生物膜培养阶段,随着微生物生长,对COD、 NH_4^+-N 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的累计转化量(即各营养物30 d的消耗量之和)如图2所示。排泥后,各营养物的消耗

丝毫不受影响,且 NH_4^+-N 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的累计转化趋势变好,这说明填料上附着的微生物生长良好,悬浮填料挂膜成功。

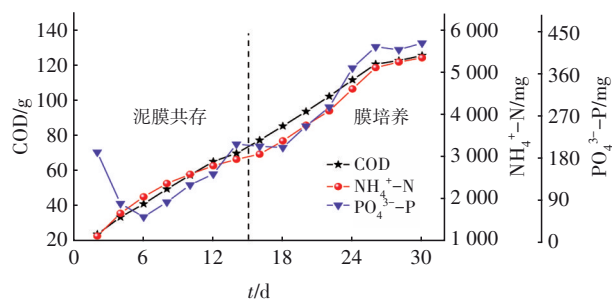
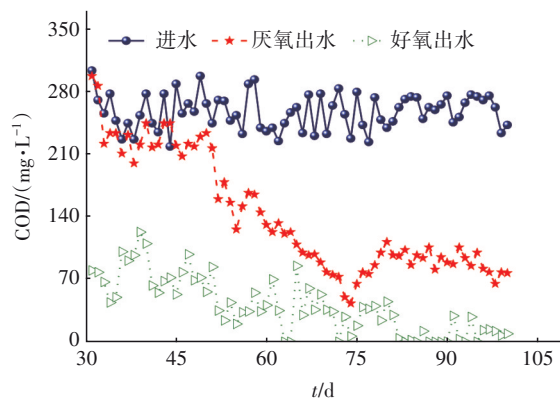


图2 生物膜培养阶段各水质参数累计转化量

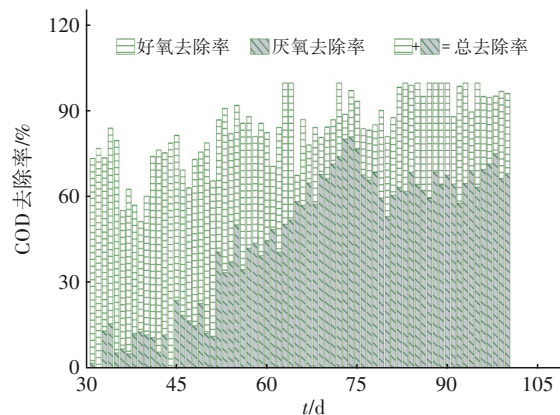
Fig.2 Cumulative transformation of water quality parameters in biofilm culture stage

2.2 磷去除和富集效果

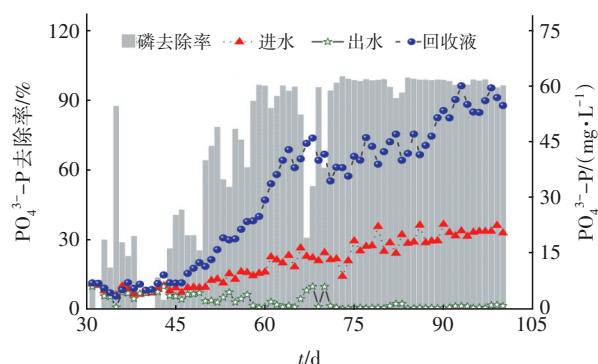
以上述培养的聚磷生物膜为功能主体,利用原水中碳源去除和富集磷,结果如图3所示。可见,利用原水中的碳源进行生物膜回收磷是可行的,出水磷浓度低至0.5 mg/L,且回收液的磷浓度最高可达60 mg/L,满足磷产品再加工的标准(50 mg/L)。



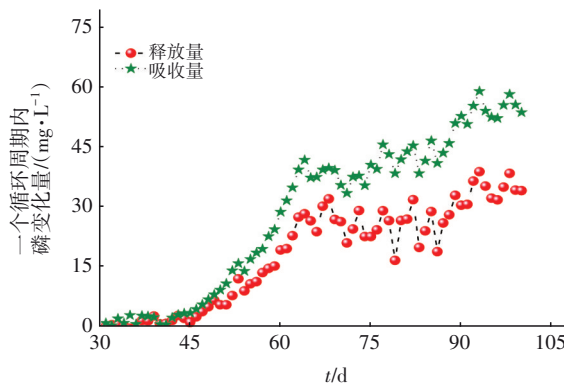
a. 进出水COD浓度



b. COD去除率



c. 进出水及回收液 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度



d. 一个循环周期内 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 变化量

图3 生物膜系统磷和有机物变化

Fig.3 Phosphorus and organic matter changes in biofilm system

在31~45 d, COD去除主要依靠好氧段异养微生物的消耗,好氧段出水COD浓度在50~120 mg/L范围内变化,总去除率在55%~85%波动;此阶段,反应器无明显的吸释磷效果,每个循环周期内的吸、释磷量均维持在0~4 mg/L左右,出水磷浓度保持高水平(4~6 mg/L),磷去除率波动较大,推测是生物膜在适应此种运行模式。在45~75 d,碳源的消耗由好氧段逐步过渡到厌氧段,厌氧段结束时的COD浓度明显降低,稳定至50 mg/L左右,厌氧段对COD的去除率较前一阶段显著提高,最高可达80%;在此过程中,生物膜的吸释磷效果逐步提升,回收液的磷浓度也呈逐渐上升状态,稳定在45 mg/L左右,出水磷浓度可维持在0.5 mg/L以下,每天的厌氧/好氧循环中,吸磷量和释磷量均大幅增加,反应器性能增强。在75~100 d,厌氧段的碳源消耗情况较前一阶段有所下降且趋于稳定,COD的厌氧去除率为60%~70%,厌氧段结束时的COD浓度保持在70~100 mg/L,剩余碳源在接下来的好氧段消耗完全;在此阶段反应器的性能继续增强,回收液磷

浓度最高可达 60 mg/L,且出水磷浓度稳定在 0.5 mg/L 以下,去除率稳定在 98% 左右;此外,生物膜的吸磷能力逐步提高,磷吸收量呈阶梯上升状态,但释放量较前一阶段呈波动上升状态,无显著提升。

在以往的生物膜法去除、富集磷研究中^[8,11],多是以经过有机物回收后的城市污水为应用场景,污水进入主反应器后,先进行好氧处理将磷从水中转移至生物膜,处理水排出系统;再引入添加碳源的回收液在厌氧环境下接纳生物膜释磷,并将回收液排入收集罐。经过多次循环作,可得富磷溶液。而本研究聚焦于以城市污水中原有碳源去除、富集磷,在 70 d 的运行中,回收液磷浓度最高可达 60 mg/L,且出水磷浓度低至 0.5 mg/L,证明了其可行性。但在运行过程中也存在一些问题,例如运行后期生物膜释磷量未能继续大幅提升、聚糖菌(GAOs)的丰度高于聚磷菌(PAOs),这些都需要进一步研究。

2.3 厌氧段磷浓度的变化

在磷去除与富集阶段的第 93、94 天,对反应器内 DO、ORP、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度的沿程变化进行了监测,结果如图 4 所示。ORP 自厌氧开始呈直线下降,在 90 min 左右达到最低值(约为 -200 mV),然后出现回升;而磷浓度也在 90 min 达到最大值后下降。推测是由于桨片搅拌将氧气带入并溶解到混合液中,同时在厌氧末端碳源消耗殆尽,无法维持严格的厌氧环境,导致 PAOs 合成多聚磷酸盐(Poly-P),进而出现磷浓度降低、释磷性能受到抑制的现象。为证实这一推测,在随后的循环周期中向反应器通入氮气,结果如图 4(c)、(d)所示。可以看出,该操作并未改变 ORP 回升的现象,反而导致厌氧段前 90 min 内释磷量降低、释磷性能减弱。为何在 90 min 后出现 ORP 回升和磷浓度降低的现象还未知,是否因为 ORP 的回升导致厌氧末端释磷量降低,释磷性能未能继续强化,这些都需要进一步的研究探讨。

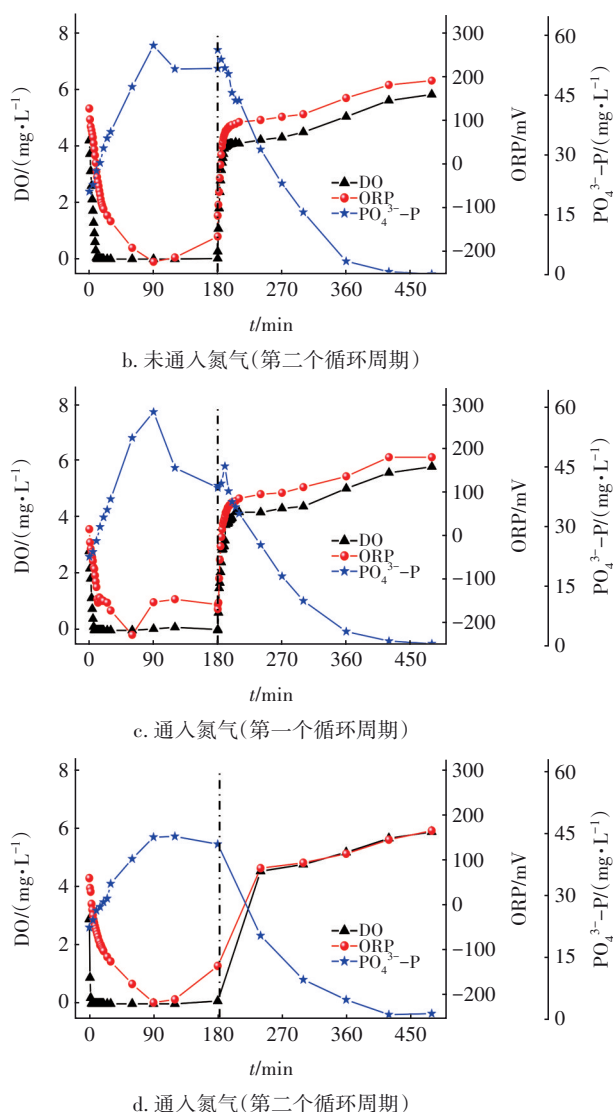
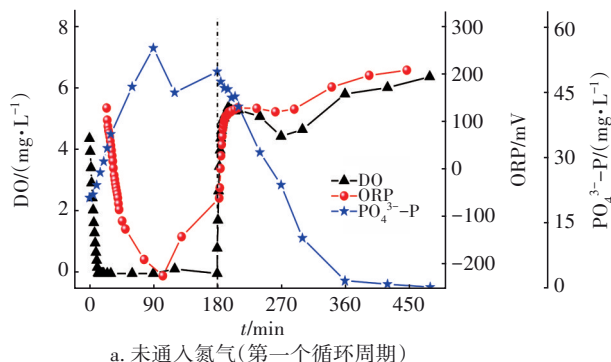


图4 不同循环周期内 DO、ORP、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 沿程变化曲线

Fig.4 Change curve of DO, ORP and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ along the reactor in different cycles

2.4 进水氨氮浓度对磷去除与富集效果的影响

在以往的生物膜磷回收工艺中,为抑制硝化细菌的增殖,进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度往往低于城市污水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度或者添加抑制剂来抑制硝化反应的产生。例如, Wong 等^[9]在进行聚磷生物膜研究时,进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度仅为 3 mg/L。本课题组前期的研究发现,氨氮浓度过高会引起生物膜内硝化细菌增殖,与聚磷菌争夺氧气,抑制吸磷,进而影响厌氧段的释磷;另外,亚硝酸盐的存在也会抑制好氧段磷的吸收^[17],故将进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度定为 10 mg/L。在此浓度下,生物膜系统运行稳定,出水氨氮浓度在 3 mg/L 以下,磷去除与富集效果未受到硝化作用的影响。

响。鉴于此,课题组提出了厌氧氨氧化技术和生物膜磷回收系统耦合工艺,既可降低氨氮浓度,又可利用原水中的碳源进行磷回收,同时去除进水中的碳、氮、磷等营养物。

2.5 高通量测序结果分析

2.5.1 细菌丰度与多样性分析

采用高通量测序对接种污泥样品(Day1)以及磷去除与富集阶段第31天、第100天的生物膜样品(Day31、Day100)的微生物多样性和丰富度进行分析,结果如表1所示。3个样品的有效序列数(OTU)分别为69 452、72 709和69 809,覆盖度分别为99.99%、99.99%、100.00%,表明所获得的序列文库可以代表微生物的多样性。Shannon指数降低,说明功能微生物显著增加;Chao指数呈下降趋势,反映了物种多样性也呈下降趋势;Simpson指数增加,表明生物膜中的微生物丰富度和多样性越来越低,一定程度也能说明优势菌种占比越来越高。

表1 微生物多样性指标

Tab.1 Diversity indices of bacterial community

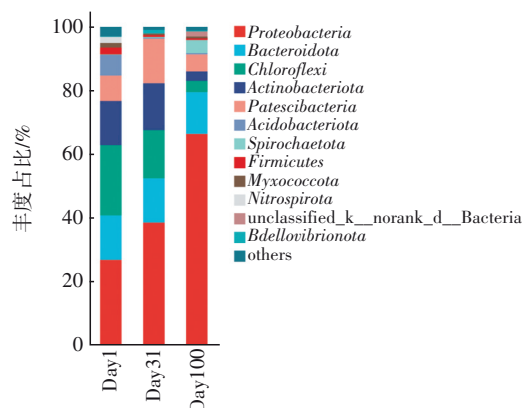
样品	Shannon 指数	Simpson 指数	Chao 指数
Day1	2.022	0.171	23
Day31	1.685	0.232	18
Day100	1.271	0.465	16

2.5.2 细菌种群特性分析

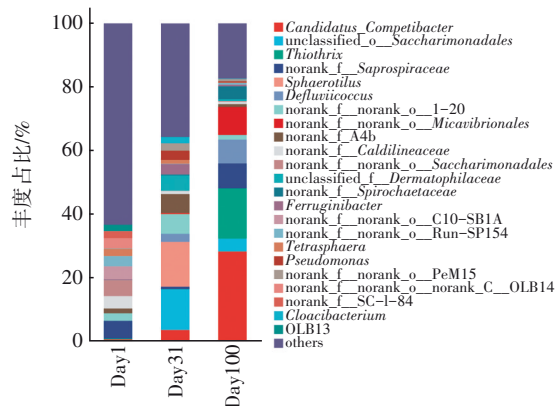
运行过程中微生物群落的变化如图5所示。在门水平上,优势菌的变化明显,Day31样品中的优势菌门有 *Proteobacteria* (38.5%)、*Chloroflexi* (15.1%)、*Actinobacteriota* (14.8%)、*Patescibacteria* (14.0%) 和 *Bacteroidota* (13.9%)。 *Chloroflexi*、*Actinobacteriota*、*Patescibacteria* 的相对丰度随运行时间的延长均有不同程度的降低。 *Proteobacteria* 是污水处理厂活性污泥中常见的菌属,包含与除磷相关的各种菌属^[18],在本实验中, *Proteobacteria* 为优势门,相对丰度大幅增加(Day100为66.4%),这也与其他生物膜磷回收系统的研究结果相同^[19-20]。

为了进一步明晰磷去除与富集阶段优势菌以及细胞群落的演化,对属水平上相对丰度>2%的微生物进行分析,结果如图5(b)所示。随着运行时间的延长,生物膜中优势菌属的种类改变,Day31中的 *unclassified_o__Saccharimonadales* (12.8%→4%)、*Sphaerotilus* (14%→0.1%)等优势菌属的相对丰度均减少,表明了微生物群落丰富度的降低。在Day100

生物样品中, *Candidatus_Competibacter* (28.1%) 和 *Deftuviicoccus* (7.5%) 成为了优势菌属,这可能与进水的碳源组成(乙酸钠)以及C/P(20~40)有利于GAOs的生长有关^[21-22]。 *Candidatus_Competibacter* 是公认的GAOs,会与PAOs竞争碳源,但其也有利于更具黏性的EPS形成,在膜培养阶段,多糖含量大幅增加可能与 *Candidatus_Competibacter* 逐渐增多有关。聚磷菌 *Pseudomonas* 占比较小,仅为2.9%, Song等人^[23]在颗粒污泥除磷实验中也观察到同样的结果,当进水C/P为40时, *Candidatus_Competibacter*、*Deftuviicoccus* 的相对丰度增加至24.9%和16.0%,而 *Pseudomonas* 仅为1.02%。



a. 门水平的微生物分布



b. 属水平的微生物分布

图5 生物膜系统内微生物群落结构变化

Fig.5 Distribution of bacterial community

在生物膜磷回收系统中,GAOs的增殖无疑是不可取的,然而,在上述文献以及本实验中都发现,GAOs的大量增殖并未完全阻碍PAOs的生长,反应器仍具有吸释磷的性能,但仍需要进一步制订有利于PAOs生长以及抑制GAOs的优化策略,例如调整进水与回收液体积比,使得反应器的C/P降至10~

20或者更改进水碳源类型,以满足PAOs的生长条件^[24]。

3 结论

① 生物膜培养阶段,厌氧、好氧各4 h,每48 h换水,充水比为25%,有机负荷为0.25 kg/(kgMLSS·d),悬浮填料可在30 d内完成挂膜。

② 利用原水中有机碳源的生物膜工艺回收磷是可行的。在磷去除与富集阶段,出水COD可稳定在50 mg/L以下,去除率稳定在98%左右,出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 可稳定在0.5 mg/L左右,回收液磷浓度稳定在50~60 mg/L之间,最高可达60 mg/L。

③ 运行过程中,微生物物种丰富度和多样性降低,优势菌群占比增加。门水平上 *Proteobacteria* 丰度由38.5%增至66.4%;属水平上 *Candidatus_Competibacter* 由3.4%增至28.1%, *Defluviicoccus* 由2.6%增至7.5%,功能聚磷菌为 *Pseudomonas*, 占比为2.9%。

参考文献:

- [1] 郝晓地,于文波,时琛,等. 污泥焚烧灰分磷回收潜力分析及其市场前景[J]. 中国给水排水, 2021, 37(4): 5-10.
HAO Xiaodi, YU Wenbo, SHI Chen, *et al.* Potential analysis and market prospects of phosphorus recovery from the bottom ashes of sludge incineration [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(4): 5-10 (in Chinese).
- [2] 丁燕燕,于鸿宇,戴晓虎. 污泥中的磷及回收技术研究进展[J]. 中国给水排水, 2022, 38(16): 29-34.
DING Yanyan, YU Hongyu, DAI Xiaohu. Research progress on phosphorus in sludge and its recovery technology [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(16): 29-34 (in Chinese).
- [3] CORDELL D, DRANGERT J O, WHITE S. The story of phosphorus: global food security and food for thought [J]. Global Environmental Change, 2009, 19(2): 292-305.
- [4] 田建民. 从城市污水和污泥中回收磷资源的研究[J]. 太原理工大学学报, 2006, 37(5): 572-575.
TIAN Jianmin. Research on recovery of phosphorus resources from municipal sewage and sludge [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2006, 37(5): 572-575 (in Chinese).
- [5] CORNEL P, SCHAUM C. Phosphorus recovery from wastewater: needs, technologies and costs [J]. Water Science & Technology, 2009, 59(6): 1069-1076.
- [6] 聂超,马伟芳,郭浩,等. 城市污水厂侧路回收磷技术研究与工程示范[J]. 中国给水排水, 2014, 30(21): 21-25.
NIE Chao, MA Weifang, GUO Hao, *et al.* Side-stream phosphorus recovery technology in urban sewage treatment plant and demonstration project [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(21): 21-25 (in Chinese).
- [7] GUERRERO J, GUISASOLA A, BAEZA J A. Controlled crude glycerol dosage to prevent EBPR failures in C/N/P removal WWTPs [J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 271: 114-127.
- [8] 潘杨,郑莹,黄勇,等. 一种生物膜法同步去除与富集磷的工艺: CN107311308A[P]. 2016-04-26.
PAN Yang, ZHENG Ying, HUANG Yong, *et al.* A Process of Simultaneous Removal and Enrichment of Phosphorus by Biofilm: CN107311308A[P]. 2016-04-26 (in Chinese).
- [9] WONG P Y, CHENG K Y, KAKSONEN A H, *et al.* A novel post denitrification configuration for phosphorus recovery using polyphosphate accumulating organisms [J]. Water Research, 2013, 47(17): 6488-6495.
- [10] TIAN Q, ONG S K, XIE X, *et al.* Enhanced phosphorus recovery and biofilm microbial community changes in an alternating anaerobic/aerobic biofilter [J]. Chemosphere, 2016, 144: 1797-1806.
- [11] ZHANG H, BI Z, PAN Y, *et al.* Enhanced phosphorus storage in suspended biofilm by increasing dissolved oxygen [J]. Science of the Total Environment, 2020, 722: 137876.
- [12] VAN DE GRAAF A A, MULDER A, DE BRUIJN P. Anaerobic oxidation of ammonium is a biologically mediated process [J]. Applied & Environmental Microbiology, 1995, 61(4): 1246-1251.
- [13] ADAV S S, LEE D J. Extraction of extracellular polymeric substances from aerobic granule with compact interior structure [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 154(1/3): 1120-1126.
- [14] 郑莹. 厌氧/好氧交替条件下生物膜法对废水中磷的富集研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2016.
ZHENG Ying. Enrichment of Anaerobic/Aerobic Biofilm Alternating Conditions of Phosphorus in Wastewater [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2016 (in Chinese).
- [15] 陈洪斌,梅翔,高廷耀,等. 受污染源水生物预处理挂

- 膜过程研究[J]. 水处理技术, 2001, 27(4): 196-199.
- CHEN Hongbin, MEI Xiang, GAO Tingyao, *et al.* Study on biofilm colonization of polluted raw water biopretreatment [J]. Water Treatment Technology, 2001, 27(4): 196-199 (in Chinese).
- [16] 宋悦, 魏亮亮, 赵庆良, 等. 活性污泥胞外聚合物的组成与结构特点及环境行为[J]. 环境保护科学, 2017, 43(2): 35-40.
- SONG Yue, WEI Liangliang, ZHAO Qingliang, *et al.* Chemical structure and environmental behavior of extracellular polymeric substances in sludge: a review [J]. Environmental Protection Science, 2017, 43(2): 35-40 (in Chinese).
- [17] SAITO T, BRDJANOVIC D, VAN LOOSDRECHT M. Effect of nitrite on phosphate uptake by phosphate accumulating organisms[J]. Water Research, 2004, 38(17): 3760-3768.
- [18] OKUNUKI S, KAWAHARASAKI M, TANAKA H, *et al.* Changes in phosphorus removing performance and bacterial community structure in an enhanced biological phosphorus removal reactor[J]. Water Research, 2004, 38(9): 2433-2439.
- [19] 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): 2802-2809.
- MENG Xuan, PAN Yang, ZHANG Hao, *et al.* Microbial population dynamics during domestication and cultivation of biofilm to remove and enrich phosphate [J]. Environmental Science, 2018, 39(6): 2802-2809 (in Chinese).
- [20] 尤星怡. 面向磷酸盐去除与富集的悬浮填料生物膜快速培养方法及其性能[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2018.
- YOU Xingyi. Rapid Culture Method and Performance of Suspended Filler Biofilm Facing to Phosphate Removal and Enrichment [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2018 (in Chinese).
- [21] WANG Y, JIANG F, ZHANG Z, *et al.* The long-term effect of carbon source on the competition between polyphosphorus accumulating organisms and glycogen accumulating organism in a continuous plug-flow anaerobic/aerobic (A/O) process [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(1): 98-104.
- [22] CAI W, HUANG W, LI H, *et al.* Acetate favors more phosphorus accumulation into aerobic granular sludge than propionate during the treatment of synthetic fermentation liquor[J]. Bioresource Technology, 2016, 214: 596-603.
- [23] SONG X, YU D, QIU Y, *et al.* Unexpected phosphorous removal in a *Candidatus_Competibacter* and *Deftuicoccus* dominated reactor [J]. Bioresource Technology, 2021, 345: 126540.
- [24] AHN C H, PARK J K, WHANG L M. Altered carbon flow by polyphosphate-accumulating organisms during enhanced biological phosphorus removal [J]. Water Environment Research, 2009, 81(2): 184-191.
-
- 作者简介: 丁鑫(1996-), 女, 安徽全椒人, 硕士研究生, 研究方向为水污染控制理论与技术。
- E-mail: 1367241941@qq.com
- 收稿日期: 2022-07-21
- 修回日期: 2022-10-15

(编辑: 李德强)

绿水青山就是金山银山