

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.23.013

生物除磷颗粒污泥的培养及其特性

何 瑜, 何成达, 朱腾义, 相延铮
(扬州大学 环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225100)

摘 要: 通过控制运行参数,在SBR反应器中成功培养出生物除磷颗粒污泥。稳定状态下,反应器内以白色颗粒污泥为主,同时存在黄色颗粒污泥;当进水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度低于55 mg/L时,系统对其去除率可以达到98%以上。Illumina MiSeq高通量测序结果显示,白色颗粒污泥中以聚磷菌 *Candidatus_Accumulibacter* 和反硝化聚磷菌 *Pseudomonas* 为主,占比达到46.3%;黄色颗粒污泥中以聚糖菌 *Defluviicoccus* 和 *Candidatus_Competibacter* 为主,占比为33.5%,说明颗粒污泥的颜色可能取决于其优势菌群。

关键词: 生物除磷; 好氧颗粒污泥; 有机物; 微生物群落结构

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)23-0091-08

Cultivation and Properties of Granular Sludge for Biological Phosphorus Removal

HE Yu, HE Cheng-da, ZHU Teng-yi, XIANG Yan-zheng
(College of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225100, China)

Abstract: In this paper, granular sludge capable of biological phosphorus removal was successfully cultivated in a sequencing batch reactor (SBR) through the regulation of operational parameters. In the steady state, white granular sludge constituted the predominant component, while yellow granular sludge was also observed in the reactor. When the concentration of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ was below 55 mg/L, its removal efficiency exceeded 98%. The high-throughput sequencing results obtained from Illumina MiSeq indicated that the white granular sludge predominantly comprised phosphate-accumulating organisms, specifically *Candidatus_Accumulibacter*, as well as denitrifying phosphate-accumulating organisms *Pseudomonas*, which together accounted for relative abundance of 46.3%. In the yellow granular sludge, the predominant bacterial species, glycogen-accumulating organisms *Defluviicoccus* and *Candidatus_Competibacter*, constituted 33.5% of the microbial community, suggesting that the color of granular sludge might be influenced by its dominant bacterial groups.

Key words: biological phosphorus removal; aerobic granular sludge; organic matter; microbial community composition

强化生物除磷技术是我国污水厂常用的除磷技术,目前以絮状污泥法为主,存在构筑物占地面积

基金项目: 国家自然科学基金资助面上项目(42077331)

通信作者: 何成达 E-mail: hcd@yzu.edu.cn

大、污泥沉淀时间长、二次释磷等问题。好氧颗粒污泥是由微生物自凝聚作用形成的一种特殊的生物膜,与絮状污泥相比,具有生物量大、沉降速度快、能够承受高有机负荷和耐毒性等优点^[1-2]。生物除磷颗粒污泥是一种特殊的好氧颗粒污泥,Barr等人^[3]在培养好氧颗粒污泥的过程中发现,反应器内同时存在白色和黄色两种颗粒污泥,占比为1:1,通过FISH染色后观察到白色颗粒污泥中聚磷菌含量更高;王然登^[4]研究发现,当P/C值为0.03:100时,反应器内并不会出现白色颗粒污泥,而当P/C值为1:100与2:100时反应器内都存在白色颗粒污泥,这表明进水P/C值直接影响白色颗粒污泥的形成。笔者将强化生物除磷技术与好氧颗粒污泥技术相结合,通过控制COD/PO₄³⁻-P在35~60之间,来富集反应器内的生物除磷颗粒污泥,并通过Illumina MiSeq高通量测序技术分析白色颗粒污泥与黄色颗粒污泥中微生物群落结构的差异。

1 实验材料与方法

1.1 实验装置

实验装置采用圆柱状SBR反应器,材质为有机玻璃,高为100 cm、直径为10 cm,有效容积为5 L。按厌氧/好氧交替的方式每天运行4个周期,每个周期厌氧85 min、好氧曝气210 min,曝气量设定为1.5 m³/h,沉淀时间由30 min逐步缩减至3 min。

1.2 实验用水和接种污泥

实验采用人工模拟污水,以丙酸钠为碳源、COD控制在300~750 mg/L,以磷酸二氢钾为磷源、TP控制在5~20 mg/L,COD/PO₄³⁻-P保持在35~60之间,以氯化铵为氮源、NH₃-N控制在10~40 mg/L,并加入94 mg/L的MgSO₄·7H₂O、28 mg/L的CaCl₂、90 mg/L的NaHCO₃和1 mL/L微量元素,使其更接近实际污水。接种污泥取自扬州市汤汪污水处理厂,污泥浓度(MLSS)为3 500 mg/L。

1.3 检测指标及分析方法

所测水样均经定性滤纸过滤,COD、PO₄³⁻-P等指标均采用国家标准方法测定。采用场发射扫描电镜(FESEM)分析颗粒污泥的形貌特征。

好氧曝气时,取100 mL泥水混合液,依次通过孔径为2.0、0.9、0.71、0.55、0.2 mm的筛网进行过滤,通过记录不同粒径的颗粒污泥占污泥总量的比例,得到颗粒污泥的粒径分布^[5]。

系统稳定运行240 d后,分别从反应器中采集白色颗粒污泥与黄色颗粒污泥样品,进行Illumina MiSeq高通量测序,对两者的微生物多样性和群落结构演变进行比较分析。DNA采用E. Z. N. A. Soil DNA试剂盒提取,在260和280 nm波长处,使用NanoDrop1000分光光度计进行定性和定量分析。利用338F(5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCA-3')和806R(5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3')在ABI GeneAmp 9700 PCR系统上进行PCR扩增,然后利用Illumina MiSeq PE300平台对PCR产物进行高通量测序分析。

2 结果与讨论

2.1 污泥形态变化

接种污泥取自扬州市汤汪污水处理厂好氧池,呈灰褐色絮状,结构疏松,此时污泥粒径在2~750 μm之间。随着反应器的运行,污泥宏观形态变化如图1所示。

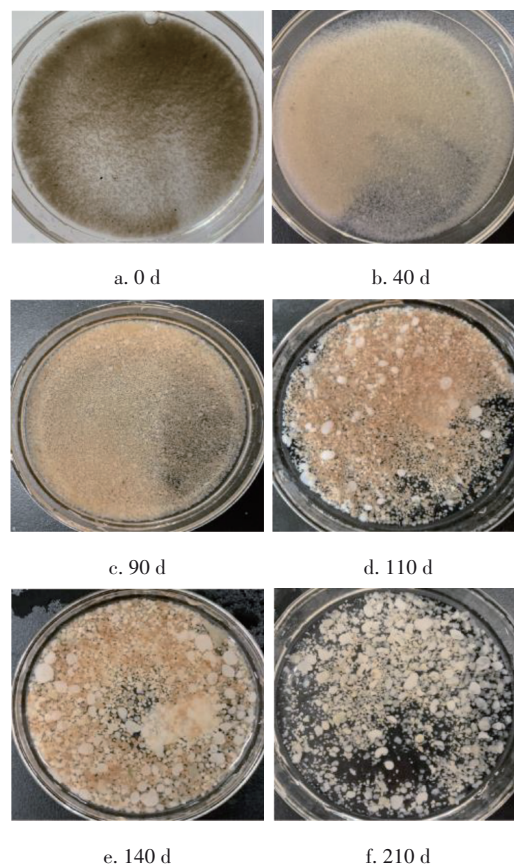


图1 反应器运行过程中污泥宏观形态特征的变化

Fig.1 Mcromorphologic characteristics of sludge during operation of SBR

反应器初始沉淀时间为 30 min,运行 20 d 后,通过缩短沉淀时间,排出沉淀性能较差的絮状污泥以促进好氧造粒。反应器运行至第 40 天时,污泥由深灰褐色变为浅褐色,在絮状污泥中可以观察到微小的白色颗粒,此时污泥处于颗粒与絮体共存的状态,如图 1(b)所示。随后继续缩短沉淀时间并增加进水中的有机物浓度,保留白色颗粒的同时促进污泥完全颗粒化。观察反应器内污泥自由沉降过程,发现白色颗粒污泥周围始终围绕着絮状污泥,阻碍其自由沉降的同时会提高周围絮状污泥的沉降速度,这导致缩短沉淀时间排放的污泥中会带有白色颗粒污泥,而部分沉淀性能较差的絮状污泥反而被留在反应器中。

SBR 运行过程中污泥粒径的分布情况如图 2 所示。第 90 天时白色颗粒污泥与黄色颗粒污泥同时存在于反应器内,但粒径都较小,粒径在 200~550 μm 之间的污泥占 55.3%,此时沉淀时间为 3 min,系统中 86% 的污泥粒径 >200 μm ,基本完成颗粒化。随后通过控制厌氧段末反应器内的有机物浓度,抑制好氧段异养菌生长,促进聚磷菌富集。运行至第 210 天时,反应器内白色颗粒污泥与黄色颗粒污泥共存,此时粒径在 0.9 mm 以上的颗粒污泥绝大多数都是白色,粒径在 0.71~0.9 mm 的颗粒污泥是白色和黄色各占一半,粒径在 0.55~0.71 mm 的颗粒污泥则几乎都是黄色。此时整个系统中几乎不存在粒径 <0.2 mm 的颗粒污泥,白色颗粒污泥相较于黄色颗粒污泥的粒径更大。

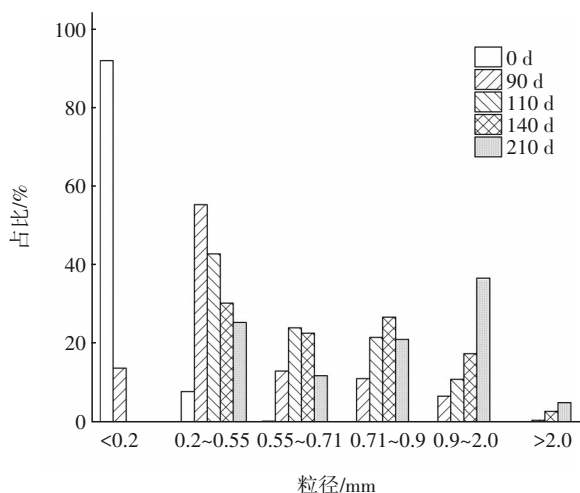


图 2 SBR 运行过程中污泥粒径的分布情况

Fig.2 Particle size distribution of sludge during operation of SBR

将白色颗粒污泥置于场发射扫描电子显微镜下观察,结果如图 3 所示。白色颗粒污泥外部轮廓清晰,呈椭圆状,表面较为光滑。颗粒内部以短杆状菌与球状菌为主,将颗粒污泥的局部进行放大,观察到颗粒是由许多微小颗粒组成的,微小颗粒之间互有空隙及孔道,并不规则地附着在一起。这些微小颗粒之间的空隙及孔道是为了让水体中的溶解氧和基质更加方便地传送到颗粒污泥内部,以此避免颗粒内部成为厌氧区,进而保证污泥颗粒结构稳定、避免解体。

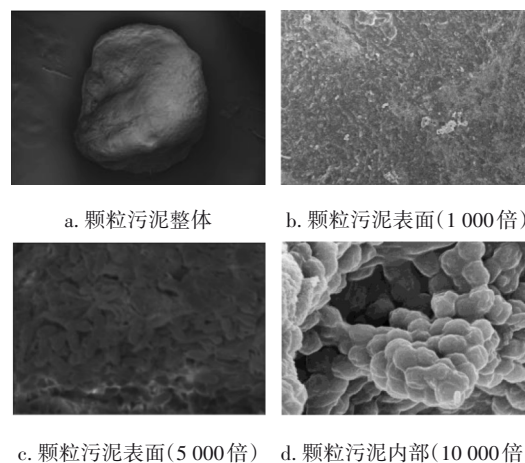


图 3 生物除磷颗粒污泥的场发射扫描电镜照片

Fig.3 FESEM pictures of biological phosphorus removal granular sludge

2.2 污泥浓度与沉降性能的变化

生物除磷颗粒污泥培养过程中 MLSS 与污泥容重指数(SVI)的变化如图 4 所示。初始 MLSS 控制在 3 500 mg/L 左右,运行初期沉淀时间保持在 30 min,随着反应器的运行,污泥不断增殖的同时沉降性能也有所提高。运行至第 20 天时,MLSS 增至 4 951 mg/L,SVI 由最初的 83.4 mL/g 降为 66.9 mL/g。此后通过逐步缩短沉淀时间创造一个选择压力,将沉降性能差的污泥排出,仅保留密度大、沉降性能好的污泥。第 30 天时,由于大量沉降性能较差的絮状污泥被排出,MLSS 下降至 4 486 mg/L。随着培养的继续进行,污泥增殖速度高于排泥速度,MLSS 经过短暂下降后逐步回升,反应器内 MLSS 整体呈现上升的趋势。为了促进反应器内污泥实现完全颗粒化,将沉淀时间调整为 3 min,第 90 天时反应器内污泥基本呈颗粒状,MLSS 为 7 647 mg/L,SVI 为 24.5 mL/g。后期随着颗粒污泥的不断增殖,通过手动排

泥的方式将MLSS控制在8 000~10 000 mg/L。颗粒污泥成熟后,稳定状态下SVI在19~22 mL/g之间。由此可见,稳定状态下系统具有较好的污泥沉降性能与较高的生物量。另外测得白色颗粒污泥的沉降速度为66.20 m/h,黄色颗粒污泥的沉降速度为42.65 m/h,白色颗粒污泥具有更快的沉降速度。

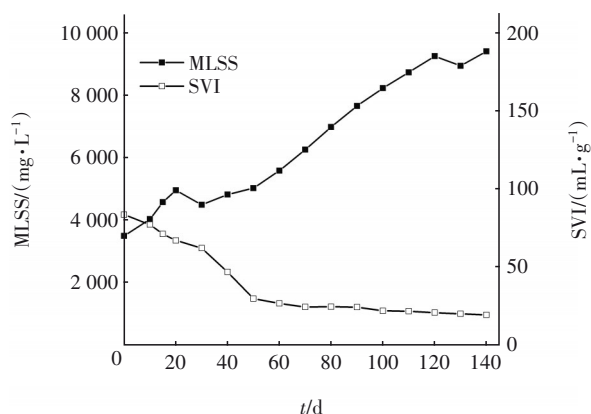


图4 MLSS及SVI的变化

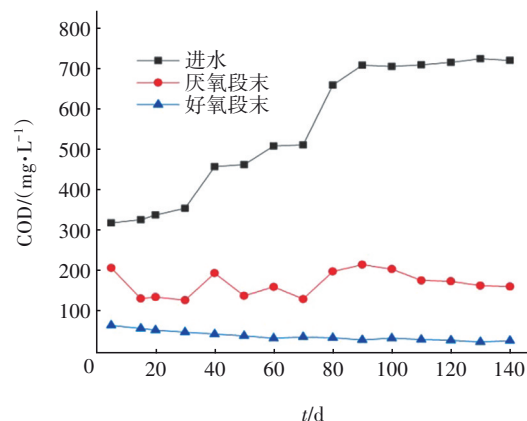
Fig.4 Variation of MLSS and SVI

2.3 生物除磷颗粒污泥对污染物的去除效果

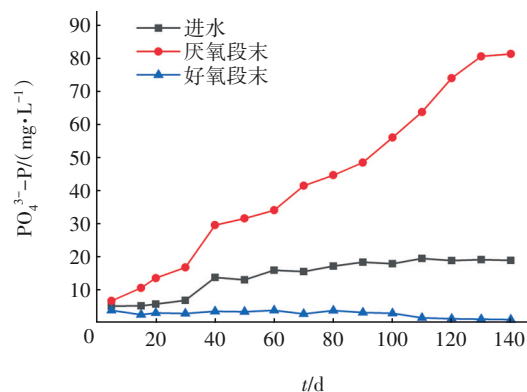
运行初期,反应器对COD与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除能力都较差(见图5)。运行至第5天时,厌氧段仅能去除111 mg/L的COD,剩余COD大部分在好氧段被消耗,去除率为80%。此时反应器内聚磷菌含量较少,进水及出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度分别为4.99和3.70 mg/L, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率仅为25.9%,厌氧段也未出现明显释磷现象。随着厌氧/好氧的交替运行,污泥逐渐适应新的环境。在第15天,COD去除率达到88.6%,厌氧段末COD浓度降为130 mg/L,COD在厌氧段的去除率大大提高,说明反应器内聚磷菌与聚糖菌的数量增多,厌氧段末 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度升至10.51 mg/L,好氧段末 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度降为2.37 mg/L,出现了明显的释磷与吸磷现象,也证明厌氧段的大部分COD是被聚磷菌消耗的,反应器内的聚磷菌经过驯化和繁殖,除磷效果明显好转。

运行到第90天时,反应器内污泥基本完成颗粒化,与絮状污泥相比,颗粒污泥含有更大的生物量。污泥颗粒化是微生物不断繁殖和积累的过程,颗粒化过程中COD与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率呈现逐渐增长并趋于稳定的状态。此时进水COD与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度分别为707、18.33 mg/L,厌氧段末COD浓度下降为214 mg/L, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度上升为48.55 mg/L,好氧段末

COD与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度分别为28、3.01 mg/L,COD去除率为96.0%, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率为83.6%。虽然厌氧段末有明显释磷且COD也在厌氧段被大量消耗,但残留的有机物进入好氧段,促进了异养微生物的生长代谢,不利于聚磷菌的富集。



a. COD



b. $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$

图5 生物除磷颗粒污泥培养过程中对COD和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除效果

Fig.5 Removal of COD and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ during culture of biological phosphorus removal granular sludge

随着反应器的运行,系统的厌氧释磷量持续升高,从48.55 mg/L增加到81.48 mg/L,同时,系统在厌氧段消耗了绝大部分的COD,这部分COD被聚磷菌吸收用于合成胞内聚合物并释磷,仅有很少一部分COD滞留到好氧段,同时,在好氧段吸磷能力也不断加强,出水中的磷酸盐浓度低于1 mg/L,这些都证明了聚磷菌的活性逐步提高,聚磷菌的含量逐步增大。

运行到第140天,系统处于稳定期。此时系统在一个周期内对污染物的去除情况如图6所示。在厌氧段,反应器内COD浓度迅速降低,同时伴随着

$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的快速积累,在厌氧段末出现 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 峰值,释磷量为 61.33 mg/L。好氧段 COD 的去除率趋于稳定, COD 浓度由初始的 719.60 mg/L 下降为出水的 26.55 mg/L,去除率为 96.3%, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 在好氧 60 min 内去除速率较快,60 min 后缓慢下降,出水浓度为 0.45 mg/L,去除率为 96.9%。后续通过控制好氧段起始有机物浓度在 60 mg/L 以下,进一步富集聚磷菌、提高白色颗粒污泥占比。

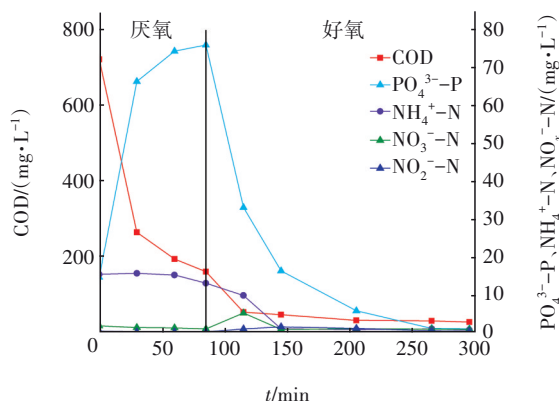


图6 系统在一个周期内 COD、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_x^-\text{-N}$ 浓度的变化

Fig.6 Variation of COD, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_x^-\text{-N}$ concentrations during one cycle in system

运行至第 210 天,为了探究系统对污水中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除能力,设置 12 个运行周期,每个周期 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度由初始的 15 mg/L 递增 5 mg/L,其他条件不变。反应器内温度为 $(25\pm 2)^\circ\text{C}$ 、pH 为 7、MLSS 为 8 000 mg/L、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度为 30 mg/L。系统对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 COD 的去除效果如图 7 所示。从图 7(a) 可以看出,在整个运行周期内,系统对污水中 COD 都有较好的去除效果, COD 去除率始终保持在 90% 以上。

从图 7(b) 可以看出,在前 9 个周期,系统中生物除磷颗粒污泥对污水中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 都有较好的去除效果,去除率均可达到 98% 以上,出水 TP 浓度可达到国家一级 A 排放标准。第 10 和 11 个周期进水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度分别增至 60、65 mg/L,系统对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除效果开始有所降低,去除率分别为 96.2% 和 94.3%。运行至第 12 周期,系统对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率大幅降低,仅为 68.7%。就 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除量而言,第 12 周期为 48.09 mg/L,与第 10 和 11 周期的 57.72 和 61.29 mg/L 差距较大。据此可知,系统对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度低于 55 mg/L 的污水除磷效果较好, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去

除率可以达到 98% 以上。

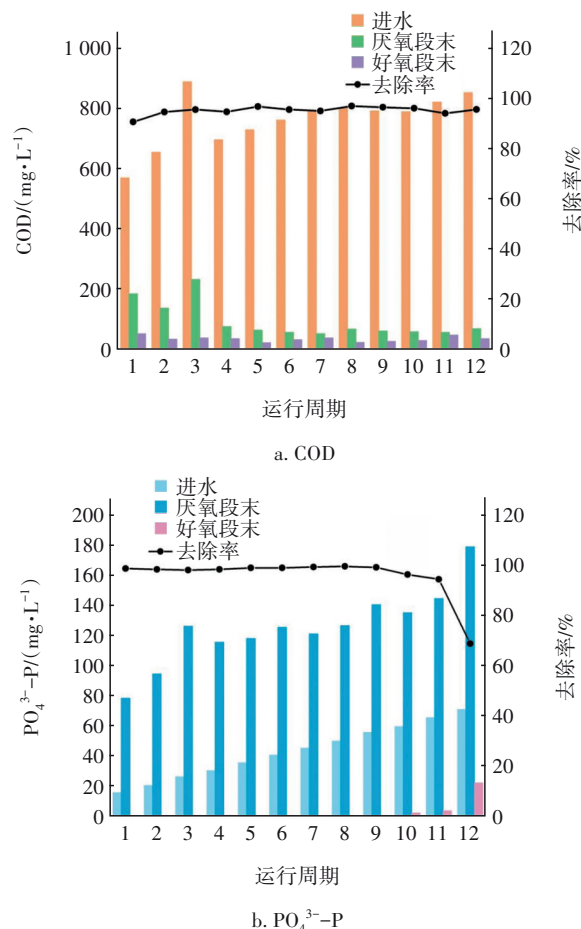
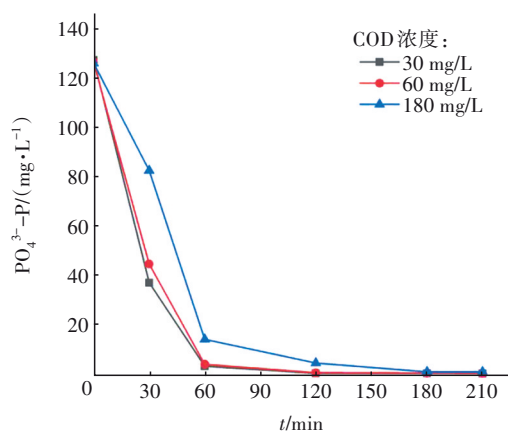


图7 系统对 COD 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除效果

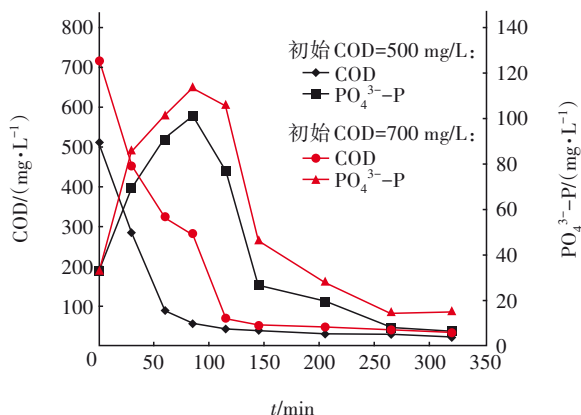
Fig.7 Removal effect of COD and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ in system

2.4 有机物浓度对生物除磷颗粒污泥的影响

在厌氧结束后沉淀 3 min,排水,控制好氧段进水 COD 浓度分别为 30、60、180 mg/L, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度为 120 mg/L, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度为 30 mg/L, pH 为 7,温度为 $(25\pm 2)^\circ\text{C}$,探究有机物浓度对生物除磷颗粒污泥去除水中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的影响,结果如图 8 所示。可知, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 在前 60 min 内被快速吸收,60 min 后趋于平缓。随着好氧段进水有机物浓度的升高,出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度也逐步升高,出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度分别为 0.47、0.53、1.12 mg/L,并且有机物浓度越低,同阶段吸收 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的速度越快。可以看出,好氧段的有机物浓度对吸磷作用有一定的影响。已有研究认为^[6],异养菌的呼吸作用会随着进水有机物浓度的增加而增强,从而导致水中溶解氧浓度变低,使得聚磷菌氧化胞内聚合物聚 β -羟基烷酸酯获得的能量变低,进而降低吸磷效率。

图8 常温条件下有机物浓度对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除效果的影响Fig.8 Effect of organic matter concentration on removal of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ at normal temperature

在常温条件下,有机物浓度对生物除磷颗粒污泥性能的影响并不显著,为此,降低反应器温度至 5°C ,探究在较低温度下有机物浓度对生物除磷颗粒污泥性能的影响,结果如图9所示。在相同条件下,当COD初始浓度分别为500和700 mg/L时,出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度差别明显,分别为6.42、17.11 mg/L。厌氧段中较高浓度的有机物可以促进颗粒污泥中聚磷菌的释磷作用,厌氧段结束后,残留的有机物进入好氧段,抑制聚磷菌的吸磷作用,使除磷效果变差,出水磷浓度变高。

图9 低温条件下有机物浓度对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除效果的影响Fig.9 Effect of COD concentration on removal of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ at low temperature

综上可知,有机物在厌氧段对聚磷菌释磷过程

起积极作用,对好氧段的聚磷菌吸磷起抑制作用,并且在一定范围内,这种抑制作用随温度的降低而增强。因此,控制好氧段起始有机物浓度在60 mg/L以下将有利于富集聚磷菌,增大白色颗粒污泥在整个系统中的占比,提升系统除磷能力。

2.5 生物除磷颗粒污泥系统中的微生物种群特性

反应器运行至第210天时,通过人工筛分方式将白色颗粒污泥与黄色颗粒污泥分离,分别对这两个样本进行细菌16S rRNA基因的Illumina MiSeq高通量测序分析,经过抽平处理后得到39 938条高质量序列,由图10所示的稀释曲线可知,两个样本序列均满足微生物多样性分析要求。

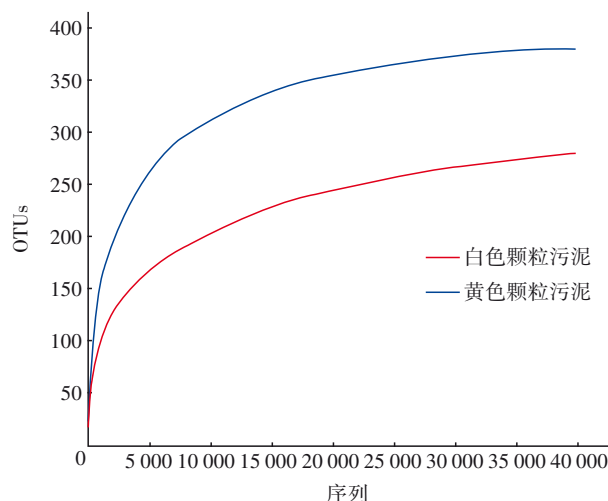


图10 稀释曲线

Fig.10 Rarefaction curves

对2个样本进行微生物种群多样性及丰富度的对比,结果见表1。2个样本的覆盖率均超过了99.8%,表明本研究中构建的序列库真实性较高。Sobs、Chao、Ace指数表明,白色颗粒污泥的微生物丰富度低于黄色颗粒污泥。与黄色颗粒污泥相比,白色颗粒污泥的Shannon指数较小、Simpson指数较大,表明白色颗粒污泥的微生物多样性较低。一般来说,微生物多样性越低,则说明可能存在某种优势菌群,起到了一种富集作用,可能会增强系统对某一种污染物的去除能力。由上述分析可知,白色颗粒污泥可能实现了部分菌群的富集效果。

表1 不同样本的微生物多样性和丰富度

Tab.1 Biodiversity and richness of different samples

项目	Sobs	Chao	Ace	Simpson	Shannon	Coverage
白色颗粒污泥	280	310.885 7	314.740 7	0.126 8	3.086 3	0.998 8
黄色颗粒污泥	380	382.833 3	386.412 0	0.053 5	3.976 3	0.999 6

白色和黄色颗粒污泥样本共获得了 408 个 OTUs,其中,2 个样本所单独特有的 OTUs 数量分别为 17 和 128,分别占总数的 4.16%、31.37%;而 2 个样本共有的 OTUs 数量为 263,分别占各样本 OTUs 总数的 93.92% 和 67.26%。说明白色颗粒污泥的微生物丰富度较低,这与多样性指数结果一致。

为了进一步探究不同有机物浓度对微生物群落结构的影响,分别在门和属水平上对 2 个样本进行微生物群落结构分析,结果如图 11 所示。由图 11(a)可知,在门水平上,2 个样本中 *Proteobacteria* 都是绝对的优势菌门,占比分别为 76.8%(白色)和 64.4%(黄色);其次为 *Bacteroidota*,占比分别为 16.9%(白色)与 22.5%(黄色)。*Chloroflexi* 在 2 个样本中所占比例分别为 3.1%(白色)和 4.1%(黄色)。*Proteobacteria*、*Bacteroidota*、*Chloroflexi* 均为污水处理中最常见的菌门,它们普遍存在于活性污泥、生物膜、厌氧颗粒污泥和好氧颗粒污泥中^[7-10]。相较于黄色颗粒污泥,具有反硝化功能的 *Proteobacteria* 在白色颗粒污泥中的占比较大,而从已有的一些研究可知,*Proteobacteria* 也是生物除磷的关键功能菌,因此可以推测白色颗粒污泥中的 PAOs 含量更高。

在属水平上,2 个样本中共检测到 219 种菌属,将相对丰度低于 3% 的菌属归于 others,分析结果如图 11(b)所示。*Candidatus_Accumulibacter* 在白色与黄色颗粒污泥中的相对丰度分别为 30.8% 与 2.6%。*Candidatus_Accumulibacter* 是一种聚磷菌^[11],在培养过程中逐渐成为白色颗粒污泥中的优势菌群,这表明聚磷菌有一定的自凝聚作用,且白色颗粒污泥在系统中起主要的除磷作用。*Pseudomonas* 在两种颗粒污泥中的相对丰度差异也较大,分别为 15.5%(白色)与 0.03%(黄色)。*Pseudomonas* 是一种反硝化聚磷菌,可以利用 NO_3^- -N 为电子受体进行反硝化脱氮除磷,白色与黄色颗粒污泥较大的体积差可能是导致其难以在黄色颗粒污泥中生存的原因。由反应器内颗粒污泥的 FESEM 图像可观察到,颗粒污泥具有较为紧实的内部结构,即使在好氧条件下氧气亦难以抵达颗粒中心,而且体积较大的白色颗粒污泥中心存在更多的缺氧环境,更有利于 *Pseudomonas* 的富集。在黄色颗粒污泥中,*Defluviicoccus* 与 *Candidatus_Competibacter* 的相对丰度都较高,分别为 17.5% 与 16.0%。*Defluviicoccus* 与 *Candidatus_Competibacter* 都是聚糖菌,由此推测

颗粒污泥的颜色可能取决于其中含有的优势菌群及其占比。聚糖菌与聚磷菌在厌氧阶段共同竞争碳源,但聚糖菌不具备储存磷酸盐的能力,聚糖菌的大量存在常常导致系统除磷能力不理想,甚至使整个系统崩溃。因此去除系统中的黄色颗粒污泥并富集白色颗粒污泥将有助于提高其除磷能力。

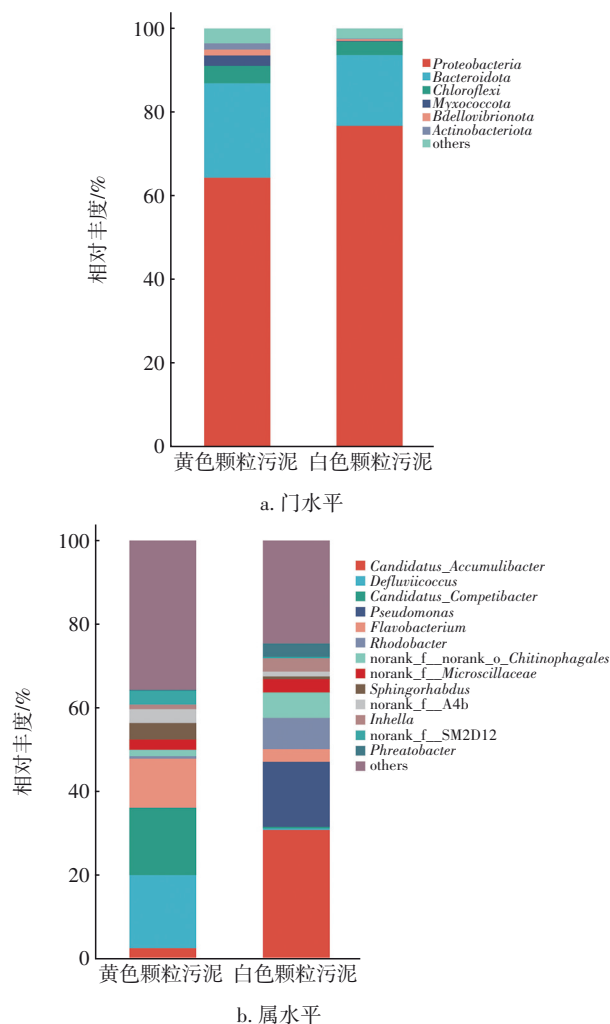


图 11 微生物功能菌群分布

Fig.11 Distribution of functional microbial community

3 结论

① 控制 $\text{COD}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 处于 35~60 之间,以厌氧/好氧交替方式运行 SBR,反应器中出现白色颗粒污泥,通过逐步提高 COD 浓度与缩短沉淀时间,系统中最终以白色颗粒污泥为主,同时存在黄色颗粒污泥。

② 在稳定运行期间,系统具有良好的除磷能力,当进水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度低于 55 mg/L 时,对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率可以达到 98% 以上,出水 TP 浓度可达到国

家一级A排放标准。

③ 有机物浓度是影响系统去除污染物效果的重要因素。在厌氧段较高的有机物浓度有助于系统释磷,但在好氧段过高的有机物浓度又会影响系统吸磷,控制好氧段有机物浓度在60 mg/L以下,将有助于系统富集聚磷菌。

④ 系统中白色颗粒污泥与黄色颗粒污泥的微生物群落结构差异明显,其中,白色颗粒污泥以聚磷菌 *Candidatus_Accumulibacter* 与反硝化聚磷菌 *Pseudomonas* 为主,占比为46.3%;黄色颗粒污泥以聚糖菌 *Defluviicoccus* 与 *Candidatus_Competibacter* 为主,占比为33.5%。颗粒污泥颜色的不同可能取决于其中含有的优势菌及其占比。

参考文献:

- [1] JIANG H L, TAY J H, MASZENAN A M, *et al.* Enhanced phenol biodegradation and aerobic granulation by two coaggregating bacterial strains [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(19): 6137-6142.
- [2] WANG S G, LIU X W, GONG W X, *et al.* Aerobic granulation with brewery wastewater in a sequencing batch reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98: 2142-2147.
- [3] BARR J J, COOK A E, BOND P L. Granule formation mechanisms within an aerobic wastewater system for phosphorus removal [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2010, 76(22): 7588-7597.
- [4] 王然登. SBR生物除磷系统中颗粒污泥的形成及其特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- WANG Randeng. Formation and Characteristics of the Granules Formed in Biological Phosphorus Removal SBR System [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015 (in Chinese).
- [5] LIU H B, XIAO H, HUANG S, *et al.* Aerobic granules cultivated and operated in continuous-flow bioreactor under particle-size selective pressure [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, 26(11): 2215-2221.
- [6] HESSELMANN R P X, WERLEN C, HAHN D, *et al.* Enrichment, phylogenetic analysis and detection of a bacterium that performs enhanced biological phosphate removal in activated sludge [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 1999, 22(3): 454-465.
- [7] QU F S, LIANG H, HE J G, *et al.* Characterization of dissolved extracellular organic matter (dEOM) and bound extracellular organic matter (bEOM) of *Microcystis aeruginosa* and their impacts on UF membrane fouling [J]. *Water Research*, 2012, 46(9): 2881-2890.
- [8] HU M, WANG X H, WEN X H, *et al.* Microbial community structures in different wastewater treatment plants as revealed by 454-pyrosequencing analysis [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 117: 72-79.
- [9] LUO J H, LIANG H, YAN L J, *et al.* Microbial community structures in a closed raw water distribution system biofilm as revealed by 454-pyrosequencing analysis and the effect of microbial biofilm communities on raw water quality [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 148: 189-195.
- [10] LIAO R H, LI Y, WANG Z, *et al.* 454 pyrosequencing analysis on microbial diversity of an expanded granular sludge bed reactor treating high NaCl and nitrate concentration wastewater [J]. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 2014, 19: 183-190.
- [11] MCSWAIN B S, IRVINE R L, WILDERER P A. The influence of settling time on the formation of aerobic granules [J]. *Water Science and Technology*, 2004, 50(10): 195-202.

作者简介:何瑜(1995-),女,江苏常州人,硕士研究生,研究方向为水污染控制。

E-mail:heyu0607@163.com

收稿日期:2022-11-20

修回日期:2023-05-26

(编辑:刘贵春)