

反硝化除磷颗粒污泥的培养与除磷性能

李 军¹, 张宇坤¹, 韦 甦¹, 王亚宜², 马 骁¹, 彭永臻³

(1. 浙江工业大学 建筑工程学院, 杭州 310014; 2. 同济大学 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092;
3. 北京工业大学 北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100124)

摘 要: 以普通絮状污泥为接种污泥, 人工配制生活污水, 采用厌氧/缺氧/好氧的运行方式, 通过在缺氧段投加硝酸盐氮和控制选择压, 经 98 d 的培养与调整在 SBR 中获得具有反硝化除磷功能的颗粒污泥. 稳定运行的颗粒污泥粒径主要在 0.3 ~ 0.5 mm, SVI 约为 45 mL/g, $\rho(\text{MLSS})$ 约为 4 000 mg/L. 具有反硝化除磷功能的颗粒污泥对 COD、氨氮和磷酸盐的去除率分别可达 88%、96% 和 90%. 通过分析磷的去向及 X 射线衍射检测结果可知存在颗粒污泥的磷酸盐沉淀除磷现象. 培养的反硝化除磷颗粒污泥除生物除磷外, 还具有磷酸盐固化于污泥颗粒方式除磷.

关键词: 除磷; 反硝化除磷; 颗粒污泥; 选择压

中图分类号: X 703.1

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2012)03-0456-06

Culture and Phosphorus Removal Property of Granular Sludge for Denitrifying Phosphorus Removal

LI Jun¹, ZHANG Yu-kun¹, WEI Su¹, WANG Ya-yi², MA Xiao¹, PENG Yong-zhen³

(1. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;
2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science & Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The granular sludge for denitrifying phosphorus removal is successfully formed in a sequencing batch reactor (SBR) fed with synthetic wastewater, by controlling the operational modes of anaerobic/anoxic/aerobic, anoxic addition of the nitrate, and selection pressure. The granular sludge turns into a shape with a diameter of 0.3 to 0.5 mm, and sludge volume index (SVI) and mixed liquid suspended solid (MLSS) are maintained at 45 mL/g and 4 000 mg/L, respectively, during the steady operation. The granular sludge for the denitrifying phosphorus removal also shows a good nutrient removal capability, with the COD, ammonia nitrogen and phosphorus removal efficiencies of 88%, 96% and 90%, respectively. The fate of phosphorus and the X-ray diffraction test results suggest the existence of granular sludge phosphate precipitation phosphorus removal phenomena. Granular sludge for the denitrifying phosphorus removal in the experiment uses biological phosphorus removal, and it also has phosphorus removal through phosphate precipitation in granular sludge.

Key words: phosphorus removal; denitrifying phosphorus removal; granular sludge; selection pressure

收稿日期: 2010-01-16.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50878195); 北京市教育委员会科技创新平台资助项目(PXM2008_014204_050843); 浙江省重点科技计划资助项目(2008C23083).

作者简介: 李 军(1969—), 男, 教授, 主要从事污水生物处理方面的研究, E-mail: tanweilijun@zjut.edu.cn.

反硝化聚磷菌(denitrifying polyphosphate accumulating organisms, DNPAOs)以硝酸盐氮和氧气作为电子受体,细胞内聚羟基烷酸(PHAs)为电子供体,使除磷和反硝化在同一个环境下完成,避免了反硝化菌与聚磷菌对碳源的争夺,很好地实现了碳源的节省和剩余污泥的减量^[1-3]。颗粒污泥的形成是微生物体的一种自凝聚现象(auto-immobilization或self-immobilization),选择压可以表示种群内的选择作用大小。与絮状污泥相比,颗粒污泥具有生物量大、沉降速度快、抗冲击负荷等优点^[4-9]。近几年,学者对颗粒污泥的反硝化除磷性能开展了一些研究,唐艳奎等^[10]采用厌氧/好氧/缺氧的运行方式对富含反硝化聚磷菌的活性污泥进行培养,35 d后获得成熟的反硝化除磷颗粒污泥,磷的去除率可达96%;刘小英等^[11]以普通活性污泥为接种污泥,先以厌氧/好氧方式培养除磷颗粒污泥,再采用厌氧/缺氧/好氧的运行方式将其诱导成为反硝化聚磷颗粒污泥,缺氧段最大比吸磷速率为27.9 mg/(g·h)。以上研究主要通过对富含反硝化聚磷菌的污泥进行颗粒化培养或对已经颗粒化的污泥进行反硝化诱导来获得具有反硝化除磷功能的颗粒污泥,但以普通活性污泥为接种污泥直接进行反硝化除磷颗粒化培养的研究还不多。本试验尝试把反硝化除磷和颗粒污泥工艺结合起来,以普通活性污泥为接种污泥,在培养颗粒污泥的同时富集反硝化聚磷菌,并考察其除磷效果。

1 材料与方法

1.1 原水配制与接种污泥

试验用水采用人工配制污水^[12],主要成份是 CH_3COONa 、 NH_4Cl 、 $\text{KH}_2\text{PO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, COD质量浓度为250 mg/L、氨氮质量浓度为20 mg/L、磷酸盐质量浓度为9 mg/L左右。试验接种的污泥来源于某污水处理厂二沉池排放的剩余污泥。

1.2 试验装置及运行方式

试验装置如图1所示,反应器高70 cm,直径19 cm,有效容积为11 L,总容积为14 L,由顶部进水,每周出水6.5 L。采用计量泵定时在缺氧段投加一定量的 NaNO_3 。系统采用时间程序控制器控制进水、搅拌、加药、曝气、排水、闲置等过程。系统运行方式为厌氧/缺氧/好氧(A/A/O),各操作时间分别为:进水10 min,厌氧搅拌90 min,缺氧搅拌90 min,曝气120 min,沉淀20 min(培养阶段)或13 min

(调整阶段),出水20 min,闲置10 min(培养阶段)或17 min(调整阶段)。其容积负荷为 $0.59 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,在厌氧和缺氧段都进行搅拌,转速为150 r/min,好氧段曝气量为 $1 \text{ m}^3/\text{h}$,表面气速为0.98 cm/s,厌氧段 $\rho(\text{DO})$ 为0 mg/L,缺氧段 $\rho(\text{DO})$ 为0~0.3 mg/L,好氧段 $\rho(\text{DO})$ 为2~6 mg/L,系统pH值为7.4~8.5。

实验分为培养阶段、调整阶段Ⅰ、调整阶段Ⅱ三部分。在培养阶段(0—第40天)不排泥,缺氧段硝酸钠的投量使得反应器混合液 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 在0—第10天为10 mg/L;在第11天—第20天为20 mg/L;在第21天—第40天为30 mg/L,目的是初步培养并强化污泥的反硝化除磷能力。在调整阶段Ⅰ(第41天—第70天)将沉淀时间由20 min降为13 min,目的是使污泥指数(SVI)进一步降低及排出部分含磷污泥。调整阶段Ⅱ(第70天—第98天)将缺氧段 NO_3^--N 投量由30 mg/L降为20 mg/L,目的是在降低SVI的同时,减弱过高的出水 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 对反硝化除磷的抑制作用。

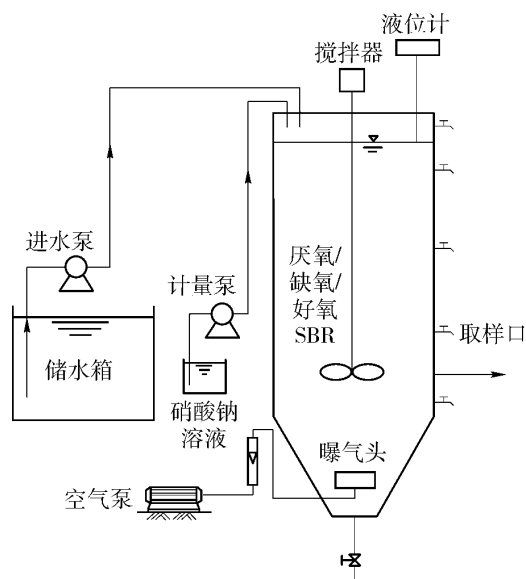


图1 厌氧/缺氧/好氧SBR试验装置示意

Fig. 1 Schematic of the anaerobic/anoxic/aerobic SBR

1.3 分析项目及方法

COD采用快速消解-分光光度法(DR/890, HACH)测定, NH_4^+-N 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 、MLSS、SVI均采用国家环保局发布的标准分析方法检测。污泥中总磷的测定采用过硫酸钾消解后测定正磷酸盐的方法^[13]。颗粒污泥的直径、粒径分布采用Motic生物显微镜拍照,通过专业图形分析软件Image-Pro Plus进行分析。

2 结果与讨论

2.1 试验结果

2.1.1 颗粒污泥的形态变化

系统运行过程中污泥形态的变化如图 2. 接种污泥结构松散,呈褐色,污泥指数为 117 mL/g,通过一段时间的培养,污泥颜色逐渐转为黄褐色,在运行 22 d 后反应器内发现细小颗粒污泥,粒径小于 0.3

mm,颗粒较为松散、不光滑. 在运行 40 d 后,发现形态完整、表面光滑、结构致密的颗粒污泥,平均粒径为 201 μm ,但形状不规则,均一性较差,平均圆度为 1.83. 在系统运行 70 d 后,污泥形态变化较小,进入稳定期. 颗粒污泥外观呈淡黄色,为近似球形或椭圆形,结构紧密,平均粒径为 331 μm ,平均圆度为 1.57.

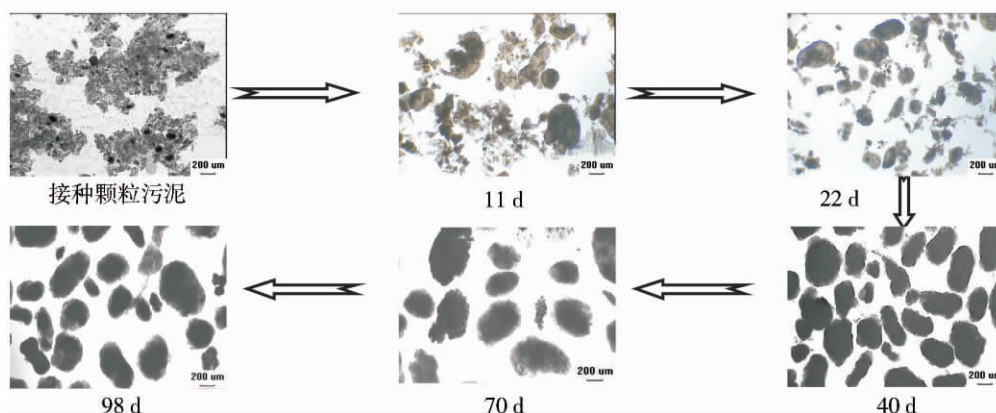


图 2 污泥形态的变化

Fig. 2 Morphological change of sludge

图 3 表示污泥颗粒化过程中粒径分布的变化过程. 40 d 后,颗粒污泥粒径基本达到平衡,粒径分布主要集中在 223 ~ 1 000 μm ,约占总量的 53%.

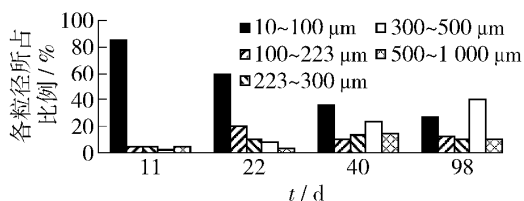


图 3 不同时期粒径分布对比

Fig. 3 Comparison of grain diameter distribution in different periods

反应器内 $\rho(\text{MLSS})$ 和 SVI 变化如图 4 所示. 培养阶段 $\rho(\text{MLSS})$ 稳定增长, SVI 逐步下降,污泥颗粒化趋势明显,培养阶段末期 $\rho(\text{MLSS})$ 约为 5 500 mg/L , SVI 平均为 59 mL/g . 第 40 天将沉淀时间由 20 min 缩短为 13 min,进入到调整阶段 I. 调整过后第 1 周 $\rho(\text{MLSS})$ 降低,导致污泥负荷增大, SVI 略微升高. 之后 $\rho(\text{MLSS})$ 逐渐增大, SVI 逐渐降低,调整阶段 I 末 $\rho(\text{MLSS})$ 约为 3 200 mg/L , SVI 平均为 55 mL/g . 在调整阶段 II 末, $\rho(\text{MLSS})$ 达到 4 000 mg/L 左右, SVI 降为 47 mL/g .

2.1.2 各阶段水质参数变化

反硝化除磷颗粒污泥运行 98 d,出水 COD 平均

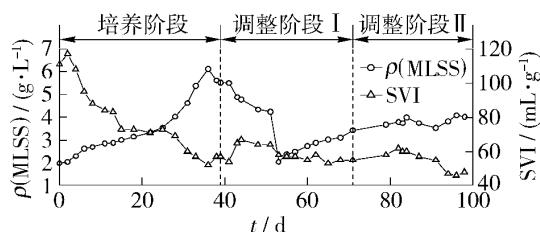


图 4 $\rho(\text{MLSS})$ 与 SVI 变化

Fig. 4 Change of sludge concentration and SVI

质量浓度 31 mg/L ,平均去除率达 88.3%.

图 5(a) 可以看出,在培养期污泥硝化功能逐渐增强,在末期出水氨氮质量浓度为 1.3 mg/L ,去除率达到 95%. 图 5(b) 可发现在培养期末期以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为主. 图 5(c) 显示随着缺氧段 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 投量的逐渐增大,污泥对磷的去除能力逐步增强,0—第 20 天出水磷质量浓度逐渐降低,在第 20 天时出水磷质量浓度达 1.5 mg/L ,由于没有排过泥,第 20 天—第 38 天出水磷质量浓度有所升高. 缺氧末 $\rho(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 、 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 基本为零意味着缺氧段反硝化吸磷效果很好,缺氧段投放 30 mg/L 的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 没有剩余;进水磷平均质量浓度 9.4 mg/L ,厌氧段结束平均质量浓度为 48.7 mg/L ,缺氧段结束平均质量浓度为 15 mg/L ,出水磷平均质量浓度为 4.1 mg/L ,缺氧段磷

的吸收量达 33.7 mg/L. 磷的平均去除率达到 56%.

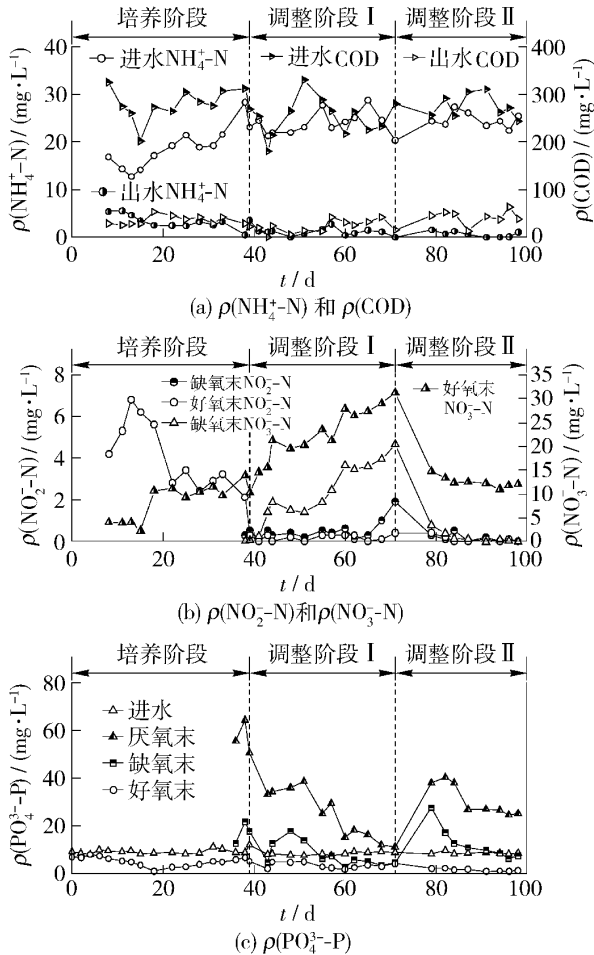


图5 进水、厌氧末、缺氧末、好氧末 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, COD, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 随时间的变化

Fig. 5 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, COD, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ concentrations of influent, end of anaerobic, end of anoxic, and end of aerobic

图 5 (a) 显示,调整阶段出水氨氮平均质量浓度为 0.88 mg/L,氨氮平均去除率达到 96%. 在调整阶段 I,由于沉淀时间缩短,出水 $\rho(\text{SS})$ 在 100 ~ 200 mg/L, $\rho(\text{MLSS})$ 急剧下降(见图 4),导致在缺氧段部分的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 不能得到利用,随之累积并造成出水硝态氮增加(见图 5(b)). 缺氧末的 $\rho(\text{NO}_3^-\text{-N})$ 由初期的 0 mg/L 逐渐增大到 20 mg/L,好氧末的 $\rho(\text{NO}_3^-\text{-N})$ 由初期的 15 mg/L 逐渐增大到 30 mg/L. 由于 $\rho(\text{MLSS})$ 的降低和出水 $\rho(\text{NO}_3^-\text{-N})$ 的升高,系统污泥厌氧放磷总量和吸磷总量总体上逐步降低,但由于大量含磷污泥的排出,磷的总去除率仍然可以达到 63%,反硝化吸磷速率为 1.8 mg/(g·h) (见

图 5(c)).

鉴于 $\rho(\text{MLSS})$ 下降使得缺氧段 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 消耗量降低,将缺氧段 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 投量由 30 mg/L 降为 20 mg/L,对系统进行第 2 次调整. 由于 $\rho(\text{NO}_3^-\text{-N})$ 的减少,在厌氧段污泥放磷总量得到快速提高,相应的缺氧吸磷量明显增加(见图 5(c)). 调整阶段 II 运行 15 d 以后出水 $\rho(\text{SS})$ 稳定在 54 ~ 103 mg/L,出水磷平均质量浓度为 0.7 mg/L,平均去除率达到 92%,反硝化吸磷速率为 2.9 mg/(g·h).

2.1.3 1 个循环反应周期内水质的变化

图 6 给出试验装置的 1 个运行周期内各水质参数的变化情况. 在厌氧段, COD 被快速利用,磷酸盐被快速释放,30 min 后 $\rho(\text{COD})$ 降到 100 mg/L 以下,磷酸盐在 45 min 后达到最高. 缺氧段开始前集中投加硝酸钠,使反应器内 $\rho(\text{NO}_3^-\text{-N})$ 为 20 mg/L,可以看到在缺氧段前 30 min,磷被大量吸收, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 也逐步被消耗, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 逐渐增多,这说明一部分 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 首先转化成为 $\text{NO}_2^-\text{-N}$,但不能被反硝化聚磷菌很快利用,所以产生了部分积累. 但值得注意的是,随着 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 被完全消耗, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 也逐渐减少,磷酸盐继续降低,这说明在颗粒污泥系统中,少量的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 不会对反硝化吸磷产生抑制,相反可以作为电子受体,进行反硝化聚磷^[4]. 在好氧段,磷酸盐含量逐步降低, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 被氧化,转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,好氧段结束 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 没有积累. 出水磷质量浓度为 1.1 mg/L,去除率可达 87%,反硝化吸磷速率为 3.2 mg/(g·h).

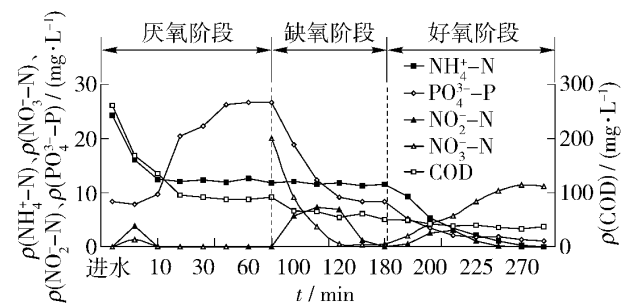


图6 1 个反应周期内 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 COD 随时间的变化(第 94 天)

Fig. 6 Profiles of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ and COD during a cycle (the 94th day)

2.2 工艺特性分析

1) 在缺氧段采用投加硝酸盐氮的方式培养具有反硝化除磷功能的颗粒污泥是可行的,同时在曝气剪切力和设置一定选择压(沉淀时间)的条件下

促成颗粒污泥的初步形成. 通过后续减少沉淀时间和调整硝酸盐氮的投量, 进一步促进了颗粒污泥的形成并稳定了反硝化除磷的效果. 因此采用本方法可以培养出有效的反硝化除磷颗粒污泥.

2) 试验运行各阶段反映出厌氧放磷量主要受到排泥量和出水硝酸盐氮的影响, 减少沉淀时间造成沉降性能差的污泥排出反应器外, 同时也减少了系统中总磷的含量. 由于出水后残留高质量浓度的硝酸盐会造成在下周期厌氧时消耗大量碳源, 造成厌氧放磷受到抑制. 缺氧反硝化吸磷量基本与厌氧放磷量成正相关关系. 反硝化吸磷量占总吸磷量的比例在各阶段为 72% ~ 95%. 好氧阶段主要作用是硝化、吸收小部分剩余磷及提供促进颗粒污泥形成的曝气剪切力.

3) 由于反硝化除磷污泥实现了颗粒化, 其所需沉淀时间将大大减少. 但一定的选择压会造成出水 $\rho(\text{SS})$ 较高, 这必然影响出水中磷的含量. 为控制稳定运行出水的 $\rho(\text{SS})$, 采用较低的有机负荷和相对长的沉淀时间, 有利于控制反应器中稳定的污泥质量浓度和降低出水的 $\rho(\text{SS})$.

4) 具有反硝化除磷功能的颗粒污泥除磷机理与普通活性污泥除磷机理有所不同. 如图 7 所示, 根据测得的污泥中总磷含量和出水 $\rho(\text{SS})$ 均值, 对稳定运行后的系统磷量进行物料衡算, 其中沉淀作用带走的磷为总进磷量与各部分测得出磷量之差. 可以看出: 出水(滤后水)磷量很低; 由于选择压的原因造成出水 $\rho(\text{SS})$ (50 ~ 100 mg/L) 相对活性污泥要高, 由此排出的磷量占的比例最大; 由于颗粒污泥的原因, 污水中钙、镁、铁等金属元素容易和磷产生磷酸盐沉淀^[5,17], 这部分磷量约占 14%, 而采用 XRD (X-ray diffraction, X 射线衍射) 测试结果证明颗粒污泥中存在大量的 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 和 FeP_4 , 如图 8 所示.

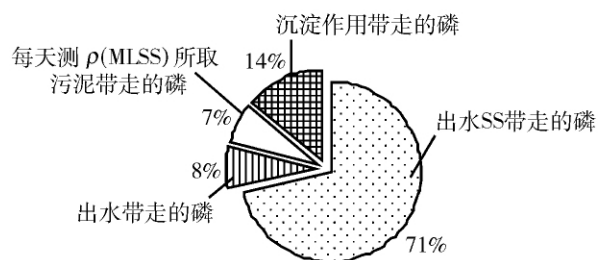


图 7 磷的去向

Fig. 7 Fate of phosphate

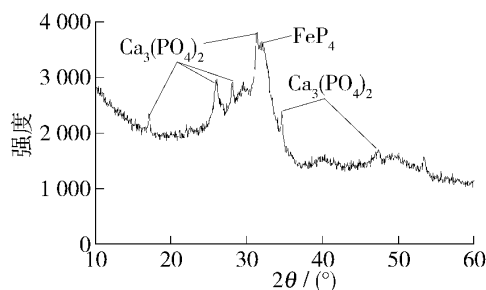


图 8 厌氧末污泥灰分 XRD 检测结果

Fig. 8 XRD result of anaerobic ending sludge

3 结论

1) 在 SBR 中采用厌氧/缺氧/好氧运行方式, 以普通絮状活性污泥为接种污泥, 在缺氧时投加硝酸盐、较低的容积负荷和一定的选择压下, 经过 98 d 的培养与调整获得了具有反硝化除磷功能的颗粒污泥.

2) 培养的反硝化除磷颗粒污泥具有良好除磷功能, 在本试验条件下, 对磷的去除率可达 90%. 系统的磷去除主要是通过出水带出的 SS 排放以及磷酸盐沉淀固化于颗粒污泥内 2 种途径实现. X 射线衍射检测结果显示, 磷酸盐沉淀成分主要有 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 和 FeP_4 .

参考文献:

- [1] WANG Y Y, PENG Y Z, PENG C Y, et al. Influence of ORP variation, carbon source and nitrate concentration on denitrifying phosphorus removal by DPB sludge from dephanox process [J]. Wat Sci Tech, 2004, 50 (10): 153-161.
- [2] WANG Y Y, PENG Y Z, LI T W, et al. Phosphorus removal under anoxic conditions in a continuous-flow A_2N two sludge process [J]. Wat Sci Technol, 2004, 50 (6): 37-44.
- [3] MERZOUKI M, BERNET N, DELGENES J P, et al. Effect of prefermentation on denitrifying phosphorus removal in slaughterhouse wastewater [J]. Bioresource Technology, 2005, 12 (96): 1317-1322.
- [4] 竺建荣, 刘纯新. 好氧颗粒活性污泥的培养及理化特性研究 [J]. 环境科学, 1999, 20 (2): 38-41. ZHU Jian-rong, LIU Chun-xin. Cultivation and physicochemical characteristics of granular activated sludge in alternation of anaerobic/aerobic process [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 1999, 20 (2): 38-41. (in Chinese)
- [5] LI A J, YANG S F, LI X Y, et al. Microbial population dynamics during aerobic sludge granulation at different

- organic loading rates [J]. Water Res, 2008, 42: 3552-3560.
- [6] SEARS K, ALLEMAN J E, BARNARD J L, et al. Density and activity characterization of activated sludge flocs [J]. Environ Eng, 2006, 132: 1235-1242.
- [7] LIU Y, TAY J H. State of the art of biogranulation technology for wastewater treatment [J]. Biotechnology Advances, 2004, 22: 533-663.
- [8] TAY J H, PAN S, HE Y, et al. Effect of organic rate on aerobic granulation. I: reactor performance [J]. Journal of Environmental Engineering, 2004, 130(10): 1094-1101.
- [9] TAY J H, PAN S, HE Y, et al. Effect of organic rate on aerobic granulation. II: characteristics of aerobic granular [J]. Journal of Environmental Engineering, 2004, 130(10): 1102-1109.
- [10] 唐艳奎, 童张法, 张寒冰, 等. 颗粒污泥的反硝化除磷研究 [J]. 中国给水排水, 2007, 23(17): 32-36.
TANG Yan-kui, TONG Zhang-fa, ZHANG Han-bing, et al. Study on denitrifying phosphorus removal by granular sludge [J]. China Water and Wastewater, 2007, 23(17): 32-36. (in Chinese)
- [11] 刘小英, 姜应和, 郭超, 等. SBR 中除磷颗粒污泥的培养和 A/O 及 A/A/O 颗粒污泥工艺除磷特性研究 [J]. 环境科学, 2009, 30(9): 2655-2660.
LIU Xiao-ying, JIANG Ying-he, GUO Chao, et al. Formation of the phosphorus removal granular sludge and phosphorus removal characteristics of the anaerobic/oxic and anaerobic/anoxic/oxic granular sludge process in SBR [J]. Environmental Science, 2009, 30(9): 2655-2660. (in Chinese)
- [12] LI J, GARNY K, NEU T, et al. Comparison of some characteristics of aerobic granules and sludge flocs from sequencing batch reactors [J]. Wat Sci Tech, 2007, 55(8-9): 403-411.
- [13] 陈国梅. 钼酸铵分光光度法测定城市污泥中的总磷 [J]. 中国给水排水, 2006, 22(2): 85-86.
CHEN Guo-mei. Ammonium molybdate spectrophotometric method for determination of total phosphorus in municipal sewage sludge [J]. China Water and Wastewater, 2006, 22(2): 85-86. (in Chinese)
- [14] 黄荣新, 李冬, 张杰, 等. 电子受体亚硝酸氮在反硝化除磷过程中的作用 [J]. 环境科学学报, 2007, 27(7): 1141-1144.
HUANG Rong-xin, LI Dong, ZHANG Jie, et al. The effect of nitrite as electron acceptor on the denitrifying phosphorus removal process [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(7): 1141-1144. (in Chinese)
- [15] APPELDOOM K J, BOOM A J, KORTSTEE G J, et al. Contribution of precipitated phosphates and acid-soluble polyphosphate to enhanced biological phosphate removal [J]. Water Res, 1992, 26: 937-943.
- [16] MAURER M, ABRAMOVICH D, SIEGRIST H, et al. Kinetics of biologically induced phosphorus precipitation in waste-water treatment [J]. Water Res, 1998, 33(2): 484-493.
- [17] 吕娟, 陈银广, 顾国维. 好氧颗粒污泥在生物强化除磷中的应用 [J]. 环境科学与技术, 2006, 29(7): 106-108.
LÜ Juan, CHEN Yin-guang, GU Guo-wei. Enhanced biological removal of phosphate by aerobic granular sludge [J]. Environmental Science and Technology, 2006, 29(7): 106-108. (in Chinese)

(责任编辑 张 蕾)