

序批式移动床生物膜反应器强化反硝化除磷处理低碳源污水

邹东雷,李平,杨卓悦,丁伟,张浩杰,刘美君

吉林大学环境与资源学院,长春 130021

摘要 为探讨反硝化除磷工艺对低碳源生活污水的处理性能,在序批式移动床生物膜反应器(SBMBBR)中,通过对反硝化除磷菌的驯化,考察厌氧过程中COD质量浓度、pH值对释磷以及缺氧阶段 NO_3^--N 和 NO_2^--N 质量浓度对反硝化吸磷性能的影响。实验结果表明:周期为8h的运行中,COD、氨氮、TP的去除率分别达到95%、90%、90%以上,出水质量浓度分别为8.07、3.67、0.46 mg/L,达到城镇污水一级A排放标准。 NO_3^--N 作为电子受体,60 mg/L取得最佳的缺氧吸磷效果,高于20 mg/L的 NO_2^--N 作为电子受体时,反硝化除磷菌活性受到抑制。研究表明,在序批式移动床生物膜反应器中,以 NO_3^--N 作为电子受体进行反硝化除磷具有很好的处理效果。

关键词 反硝化除磷;反硝化除磷菌;序批式移动床生物膜反应器

小城镇生活污水往往具有水量小、水质波动大、低碳源等特点,以吉林省为例,小城镇污水冬季COD质量浓度在200~300 mg/L,夏季由于雨水的稀释作用,污水COD质量浓度仅在100 mg/L左右。传统脱氮除磷工艺处理低碳源污水存在反硝化菌和除磷菌对碳源竞争的矛盾,经常出现脱氮除磷效果不佳的状况,进而导致富营养化问题日益突出^[1]。同时,污水处理厂好氧池曝气所产生的费用占处理总费用的70%以上,因此,减少曝气必将降低污水处理厂的运行成本。Kuba等^[2]于1993年首次发现了一种在缺氧条件下能够同时进行脱氮除磷的细菌即反硝化除磷菌。反硝化除磷菌(denitrifying phosphorus removing bacteria, DPB)在缺氧条件下,以硝酸盐作为电子受体进行吸磷,能够同时实现脱氮除磷^[3]。DPB的利用具有节省碳源、减少污泥排放量、节省曝气成本等优点^[4,5]。反硝化除磷已被作为一种可持续的和低消耗的技术受到重视,通过完善其操作和控制过程,将其性能更加可靠^[6]。

序批式活性污泥法(sequencing batch reactor, SBR),利用时间分割替代传统的空间分割,反应池集均化、初沉、生物降解、二沉等功能于一身,具有降低运行费用,提高氮和磷的去除率,降低池容等优点。以吉林省为例,将近40%的污水厂采用SBR或改进的SBR工艺(CAST)^[7],基于SBR工艺的优点,对SBR工艺的研究对于污水厂的升级改造具有非常重要的意义。移动床生物膜反应器(moving bed biofilm reactor, MBBR)工艺兼具传统流化床和生物接触氧化法的优点,是一

种新型高效的污水处理方法。与传统悬浮生长的活性污泥系统相比,附着生长的系统尤其是MBBR,能实现低温条件下更好的硝化脱氮^[8],且具有污泥产量低的优点,这对解决东北地区污水和污泥的处理问题具有很大的潜力。

基于序批式生物膜移动床反应器(SBMBBR)及反硝化除磷工艺的优越性,本文将二者结合,对SBMBBR反应器中的反硝化除磷进行研究。

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验用反应器高400 mm、长300 mm、宽240 mm,由计算机进行自动控制,有效容积为20 L(图1)。底部装有微孔曝气盘,好氧段曝气保持溶解氧(DO)为3~4 mg/L,反应器设有

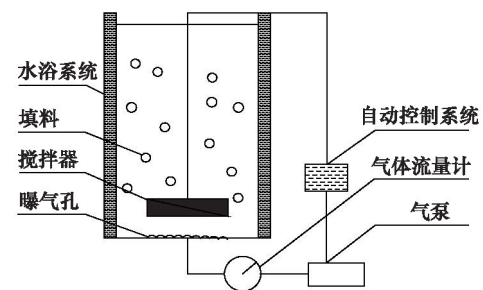


图1 SBMBBR反应器装置

Fig. 1 Schematic diagram of SBMBBR

收稿日期:2015-08-06;修回日期:2015-12-10

作者简介:邹东雷,教授,研究方向为水处理,电子信箱:zoudl@jlu.edu.cn

引用格式:邹东雷,李平,杨卓悦,等.序批式移动床生物膜反应器强化反硝化除磷处理低碳源污水[J].科技导报,2016,34(2):237-240;doi:10.3981/j.

issn.1000-7857.2016.2.040

搅拌器,在厌氧、缺氧段进行搅拌,搅拌转速为 100 r/min。反应器由水浴进行加热,水温稳定在 25℃。悬浮填料为改性生物悬浮填料,挂膜后的密度达到 1.0 kg/m³,在反应器中易与水流混合流动,填充率为 30%(图 2)。

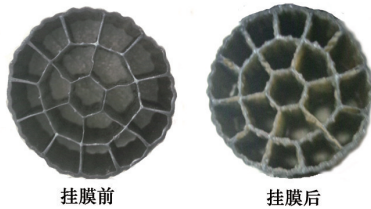


图 2 填料挂膜前后对比

Fig. 2 Filler membrane before and after packing

序批式实验于 1000 mL 烧杯中进行,每个烧杯中总污泥质量浓度(MLSS)为 4000 mg/L 左右,其中,生物膜污泥质量浓度为 2500 mg/L,悬浮污泥质量浓度为 1500 mg/L,用六联混凝搅拌仪进行搅拌,每次实验前对生物膜污泥及悬浮污泥用蒸馏水清洗 3 遍。

1.2 实验用水

实验采用人工模拟废水,通过添加蔗糖、KH₂PO₄和 NH₄Cl 控制进水中 COD、NH₄⁺-N、PO₄³⁻-P 的质量浓度,同时加入 Cu、Ca、Mg、Fe 和 S 等微量元素,并投加 NaHCO₃维持进水的 pH 值在 7~8。模拟废水的水质为:COD 质量浓度为 150~250 mg/L, NH₄⁺-N 质量浓度为 20~45 mg/L, TP 质量浓度为 5~15 mg/L, BOD₅质量浓度为 50~150 mg/L, TN 质量浓度为 30~50 mg/L。

1.3 分析项目及方法

为了评价反应器运行性能,对 pH 值、DO、COD、BOD₅、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、总氮(TN)、总磷(TP)、MLSS、固体悬浮物质量浓度(SS)、污泥沉降比(SV)和生物相等参数进行测试。化学指标分析方法为^[9]:COD 采用重铬酸钾滴定法, BOD₅ 采用稀释接种法,氨氮采用纳氏试剂比色法, NO₃⁻-N 采用酚二磺酸分光光度法, NO₂⁻-N 采用 N-1 萘-乙二胺分光光度法, TN 采用紫外分光光度法, TP 采用钼酸盐比色法, MLSS 和 SS 采用重量法, SV 采用静置沉淀法。pH 值采用 pH 值测定计测定, DO 采用 DO 仪在线监测,污泥的形态特征由光学显微镜观察。

2 结果与讨论

反硝化除磷的驯化采用两段式驯化方式,第一阶段以厌氧-好氧运行方式运行了 9 d,实现了聚磷菌(PAOs)的富集;第二阶段以厌氧-好氧-缺氧的方式运行,缺氧段前添加硝酸钠作为电子受体驯化 DPB,历时 69 d。

2.1 单周期实验

当反应器稳定运行且反硝化除磷菌富集成功后,进行单周期实验。反应器每天运行 3 个周期,每周期为 8 h,进出水均为瞬时实现。在以厌氧(2 h)-好氧(2 h)-缺氧(3 h)-沉淀(1 h)方式运行的单周期中,各物质变化情况如图 3:在厌氧 2 h 内,有机物通过微生物发酵作用产生挥发性脂肪酸

(VFAs),聚磷菌将其细胞内储存的聚磷转化为无机磷释放到水中,同时将污水中的 VFAs 转化为贮能物质聚β羟丁酸(PHB),从而使污水的 COD 降低。进水 COD 质量浓度为 230.24 mg/L,厌氧 1 h 内,其质量浓度迅速降到 20 mg/L 以下;进水氨氮质量浓度为 25.63 mg/L,厌氧初期进水中存在一定的 DO,使氨氮质量浓度小幅下降,好氧段硝化细菌和亚硝化细菌将剩余的氨氮转化为 NO₃⁻-N 或 NO₂⁻-N,使出水氨氮质量浓度为 3.67 mg/L;进水 TP 质量浓度为 8.08 mg/L,好氧阶段以氧气作为电子受体进行摄磷,使好氧段 TP 出水质量浓度为 4.26 mg/L,继而缺氧段以 NO₃⁻-N 作为电子受体通过反硝化吸磷吸收污水中残留的磷,周期结束时出水 TP 质量浓度为 0.46 mg/L;480 min 时出水 TN 在 10 mg/L 以下;出水水质澄清,SS 为 2.06 mg/L。通过以上结果表明,单周期的出水水质,能够达到城镇污水一级 A 排放标准。

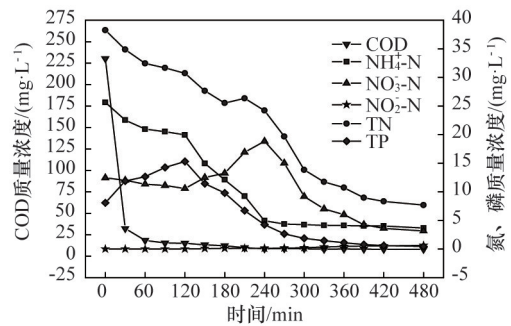


图 3 单周期内各物质的去除情况

Fig. 3 The removal efficiency of pollutants in a cycle

2.2 序批式实验

序批式实验在稳定运行 120 d 的反硝化除磷污泥上进行,考察厌氧释磷和缺氧吸磷过程中各因素的影响。

2.2.1 COD 和 pH 值对厌氧释磷的影响

有机物浓度是脱氮除磷的重要影响因素,浓度过高或过低都不能达到理想的脱氮除磷效果,因此,进行了 COD 质量浓度分别为 50、100、150、200、250、300 mg/L 时厌氧释磷的单因素实验。从图 4 可以看出,初始 TP 质量浓度为 10 mg/L,在前 30 min 内释磷速度较快,后 90 min 内释磷较缓慢且逐渐趋于平稳。COD 质量浓度为 250 mg/L 时能够达到最佳的厌氧释磷效果,出水 TP 质量浓度达到 15.75 mg/L。进水中碳源质量浓度越低,合成的 PHB 越少,对厌氧释磷提供的能量越少,

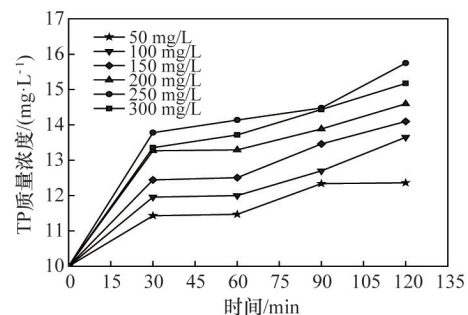


图 4 COD 质量浓度对厌氧释磷的影响

Fig. 4 Influence of COD on anaerobic phosphorus release

释磷效果越差;当碳源质量浓度较大时,异养反硝化细菌大量增殖,使释磷菌处于弱势地位,从而影响释磷。

对于城镇生活污水,其pH值基本呈中性,且中性环境为多数微生物的最适环境,因此,实验探究了pH值分别为6、7、8时对厌氧释磷效果的影响。通过图5可知,当初始TP质量浓度在10 mg/L, pH值分别为6、7、8时,均能充分释磷,厌氧段出水TP质量浓度均达到20 mg/L以上,而pH值为8时厌氧释磷效果最好。由此说明,在进行城镇生活污水处理时,其污水的pH值能够满足厌氧释磷的要求。

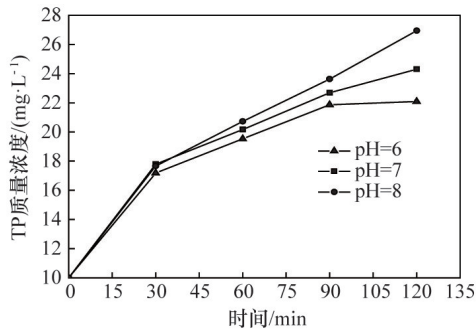


图5 pH值对厌氧释磷的影响

Fig. 5 Influence of pH on anaerobic phosphorus release

2.2.2 电子受体对缺氧吸磷的影响

以 NO_3^- -N、 NO_2^- -N作为电子受体进行反硝化除磷已得到国内外学者的广泛研究^[10-12],而对于电子受体对反硝化除磷性能的影响未取得一致的结论。

为探究 NO_3^- -N作为电子受体进行反硝化除磷时其质量浓度对反硝化除磷性能的影响,进行了 NO_3^- -N质量浓度分别为20、40、60、80、100 mg/L的单因素实验。结果如图6所示,缺氧段进水中TP质量浓度为16.5 mg/L,当 NO_3^- -N质量浓度为60 mg/L时,缺氧吸磷效果最好,出水TP质量浓度为3.05 mg/L;而当 NO_3^- -N质量浓度为20 mg/L时,会出现二次释磷现象,说明 NO_3^- -N质量浓度较低时,不足以为吸磷提供足够的电子受体,而导致磷的小幅释放。而当 NO_3^- -N质量浓度大于60 mg/L时,随着其质量浓度的增大,反硝化除磷性能减弱,说明高质量浓度的 NO_3^- -N会抑制反硝化除磷菌的活性。

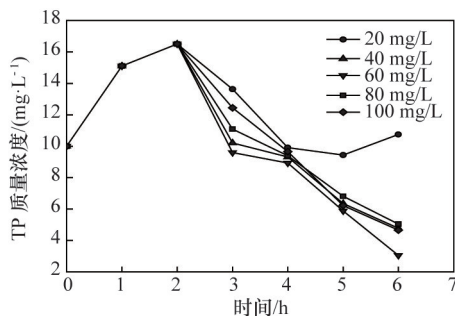


图6 NO_3^- -N对缺氧吸磷的影响

Fig. 6 Influence of NO_3^- -N on anoxic phosphorus uptake

NO_2^- -N在生物除磷过程中既可以充当电子受体,也可以是生物活性的抑制剂^[13,14]。在以 NO_2^- -N作为电子受体进行反硝化除磷的探究中,进行 NO_2^- -N质量浓度分别为10、20、30、40、50、60 mg/L的单因素实验。结果如图7所示, NO_2^- -N作为电子受体进行缺氧吸磷,当质量浓度在20 mg/L以下时,有一定的除磷效果,但低质量浓度的 NO_2^- -N不能为缺氧吸磷提供足够的电子受体;而在高质量浓度时, NO_2^- -N抑制了反硝化除磷菌的活性,反硝化除磷效果较差。Hu等^[15]比较了 NO_3^- -N和 NO_2^- -N作为电子受体对反硝化除磷的影响,表明亚硝酸盐作为电子受体的反硝化除磷脱氮过程运行周期短且吸磷释磷速率快。本研究的结论与Hu的结果是矛盾的,说明在以 NO_3^- -N进行驯化的反硝化除磷污泥中,能够利用 NO_3^- -N作为电子受体的DPB占优势地位,高质量浓度的 NO_2^- 会抑制DPB的活性。

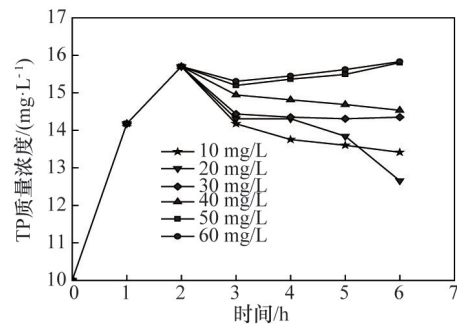


图7 NO_2^- -N对缺氧吸磷的影响

Fig. 7 Influence of NO_2^- -N on anoxic phosphorus uptake

2.3 污泥形态

对SBMBBR反应器中的悬浮污泥及生物膜污泥进行光学显微镜观察,了解污泥的形态特征以及污泥中微生物的分布情况。

图8为悬浮污泥及生物膜污泥在100倍光学显微镜下观察到的表面形态,生物膜污泥用蒸馏水稀释成菌液后进行观察。通过对比两种污泥的表面形态特征,可以发现活性污泥菌胶团表面粗糙、结构疏松,而生物膜污泥的菌胶团结构更加紧密,颗粒更加均匀,能够高度聚集好氧菌、厌氧菌、兼性菌、原生动物等微生物。同时在两种污泥中均存在后生动物轮虫(图中箭头所指),说明该阶段SBMBBR反应器处理污水效果良好。

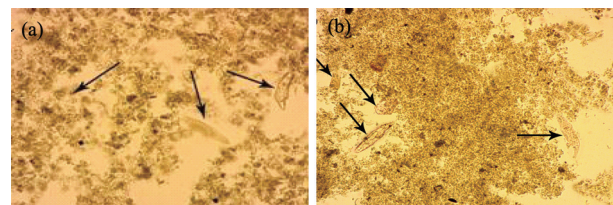


图8 悬浮污泥(a)和生物膜污泥(b)的光学显微镜图(100×)

Fig. 8 Images of suspended sludge (a) and biological membrane sludge (b) under optical microscope

3 结论

SBMBBR 反应器强化反硝化除磷处理城镇生活污水的研究表明:

1) SBMBBR 反应器以厌氧—好氧—缺氧方式运行,周期为 8 h 时, COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、SS 的出水质量浓度分别在 8.07、3.67、0.46、2.06 mg/L, 能够达到城镇污水一级 A 排放标准。且在单周期内, 曝气时间仅为 2 h, 使运行成本大大降低。

2) COD 质量浓度对厌氧释磷有一定的影响。其中, 在低碳源条件下, COD 质量浓度在 100 ~ 250 mg/L 时, DPB 能实现不同程度的释磷, 而在此范围内, COD 质量浓度越大, 释磷效果越好。对于 pH 值为中性的城镇污水, 厌氧段可以实现充分释磷。

3) 以 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 作为电子受体进行缺氧吸磷时, 吸磷效果较好, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量浓度为 60 mg/L 时最佳。而以 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 为电子受体, 吸磷效果较差, 且高质量浓度的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 会抑制 DPB 的活性, 不利于 DPB 进行反硝化除磷。

4) 通过长期的运行, 在 SBMBBR 中污泥产量小, 且从未出现污泥膨胀现象。同时, 光学显微镜图像表明, 生物膜污泥絮体更加密实, 生物群落更加丰富, 更有利于污水的处理。

参考文献 (References)

[1] 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 plugflow (A/O) process[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(1): 98-104.

[2] Kuba T, Smolders G J F, Van Loosdrecht M C M, et al. Biological phosphorus removal from wastewater by anaerobic/anoxic sequencing batch reactor[J]. *Water Science Technology*, 1993, 27(5-6): 241-252.

[3] Ahn J, Daidou T, Tsuneda S, et al. Characterization of denitrifying phosphate accumulating organisms cultivated under different electron acceptor conditions using polymerase chain reaction-denaturing gradient gel electrophoresis assay[J]. *Water Research*, 2002, 36(2): 403-412.

[4] Kishida N, Kim J, Tsuneda S, et al. Anaerobic/oxic/anoxic granular sludge process as an effective nutrient removal process utilizing denitrifying

polyphosphate accumulating organisms[J]. *Water Research*, 2006, 40(12): 2303-2310.

[5] Guo G, Wang Y, Wang C, et al. Short-term effects of excessive anaerobic reaction time on anaerobic metabolism of denitrifying polyphosphate accumulating organisms linked to phosphorus removal and N_2O production[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2013, 7(4): 616-624.

[6] Wang Y Y, Guo G, Wang H, et al. Long-term impact of anaerobic reaction time on the performance and granular characteristics of granular denitrifying biological phosphorus removal systems[J]. *Water Research*, 2013, 47(14): 5326-5337.

[7] 武中波. 城镇污水处理厂水加工工艺不同阶段汞形态分布研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.

Wu Zhongbo. Study of mercury form distribution in different stages of urban sewage treatment plant[D]. Changchun: Changshun University, 2014.

[8] Di Trapani D, Christensson M, Torregrossa M, et al. Performance of a hybrid activated sludge/biofilm process for wastewater treatment in a cold climate region: Influence of operating conditions[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2013, 77: 214-219.

[9] State environmental protection administration, editorial board of the water and wastewater analysis methods. detection and analysis methods of water and wastewater[M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 460-462.

[10] Zhang S H, Huang Y, Hua Y M. Denitrifying dephosphatation over nitrite: Effects of nitrite concentration, organic carbon, and pH[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(11): 3870-3875.

[11] Zhou S, Zhang X, Feng L. Effect of different types of electron acceptors on the anoxic phosphorus uptake activity of denitrifying phosphorus removing bacteria[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(6): 1603-1610.

[12] 白少元, 张华, 林雨倩, 等. 活性污泥反硝化除磷性能的影响因素研究[J]. *中国给水排水*, 2013, 29(15): 49-54.

Bai Shaoyuan, Zhang Hua, Lin Yuqian, et al. Factors influencing denitrifying phosphorus removal characteristics of activated sludge[J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(15): 49-54.

[13] Zeng W, Li X B, Li L, et al. Impact of nitrite on aerobic phosphorus uptake by poly-phosphate accumulating organisms in enhanced biological phosphorus removal sludge[J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2014, 37(2): 277-287.

[14] Weng D C, Peng Y Z, Wang X X, et al. Inhibition of nitrite on denitrifying phosphate removal process[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 955-959: 1955-1950.

[15] Hu J Y, Hong S L, Ng W J, et al. A new method for characterizing denitrifying phosphorus removal bacteria by using three different types of electron acceptors[J]. *Water Research*, 2003, 37(14): 3463-3471.

Enhanced denitrifying phosphorus removal to treat low carbon source sewage in sequencing batch moving bed biofilm reactor

ZOU Donglei, LI Ping, YANG Zhuoyue, DING Wei, ZHANG Haojie, LIU Meijun

College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130021, China

Abstract SBMBBR is used to investigate the performance of denitrifying phosphorus removal from the low carbon source sewage. The effects on denitrifying phosphorus removal of the COD, the pH in the anaerobic process and the $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ in the anoxic stage are studied. The results show that the removal rates of the COD, the $\text{NH}_4^+\text{-N}$, the TP are more than 95%, 90%, 90%, the effluent concentrations are 8.07, 3.67, 0.46 mg/L in the operation of a cycle of 8 h, and the urban sewage A standard is satisfied. Compared with $\text{NO}_2^-\text{-N}$ as the electron acceptor, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ of 60 mg/L as the electron acceptor can achieve the best result of the anoxic phosphorus absorption. More than 20 mg/L of $\text{NO}_2^-\text{-N}$ will inhibit the activity of denitrifying phosphorus removal bacteria. The researches show that the denitrifying phosphorus removal can achieve good results when $\text{NO}_3^-\text{-N}$ is used as the electron acceptor in the SBMBBR.

Keywords denitrifying phosphorus removal; denitrifying phosphorus removal bacteria; sequencing batch moving bed biofilm reactor

(责任编辑 王媛媛)