

A₂N 双污泥反硝化除磷系统微生物的先间歇后连续培养及快速启动

杨庆娟¹, 王淑莹^{1*}, 刘莹¹, 袁志国², 葛翀¹

(1. 北京工业大学水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100022; 2. Advanced Wastewater Management Centre, The University of Queensland, Australia)

摘要: 以实际生活污水为对象, 研究了反硝化聚磷菌 (DPB) 的驯化培养以及 A₂N 双污泥反硝化除磷系统的快速启动. 采用先独立培养反硝化聚磷菌和好氧硝化生物膜再连续运行的方式成功地快速启动了 A₂N 系统. 采用污水处理厂除磷工艺中的活性污泥为种泥, 在 SBR 系统中以先 A/O (厌氧/好氧) 后 A/A (厌氧/缺氧) 的方式运行, 32 d 成功地使反硝化聚磷菌成为优势菌属. 在 SBR 反应器中, 采用硝化效果较好的活性污泥为种泥, 好氧硝化生物膜 30 d 挂膜成功, 氨氮去除率稳定在 99% 以上. 然后, A₂N 系统连续运行, 11 d 后系统反硝化除磷效果进入稳定状态, 出水氨氮和正磷酸盐浓度均为 0, 硝态氮为 10.26 mg/L, 出水 COD 为 19.56 mg/L. COD、氨氮、总氮和磷去除率分别为 91%、100%、77% 和 100%, 说明 A₂N 系统具有很好的脱氮除磷效果, 认为系统启动成功.

关键词: 反硝化聚磷菌; A₂N 双污泥反硝化除磷系统; 序批式反应器; 驯化培养; 快速启动

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301 (2008) 08-2249-05

First Sequencing Then Connecting Cultivation of the Organisms and Fast Start-up of A₂N Two-Sludge System

YANG Qing-juan¹, WANG Shu-ying¹, LIU Ying¹, YUAN Zhi-guo², GE Chong¹

(1. Beijing Key Laboratory of Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2. Advanced Wastewater Management Centre, The University of Queensland, Australia)

Abstract: Using domestic sewage, the cultivation of denitrifying phosphorus removing bacteria (DPB) and start-up of A₂N two-sludge system were investigated in a laboratory. The A₂N system started up fast by using the method that first bringing up DPB and nitrification biofilm separately then connecting them in the A₂N system. The enrichment of DPB used activated sludge from the sedimentation tank of a wastewater treatment plant that working about phosphorus removal. In a sequencing batch reactor (SBR), the sludge mixture was operated under anaerobic-aerobic (A/O) condition firstly. Then, the activated sludge was conducted under anaerobic-anoxic (A/A) condition. During the experiment period of 32 d, DPB was successfully enriched. At the same time, utilizing the activated sludge that enriched of nitrifying bacteria, nitrification biofilm was grown up in another SBR. After 30 d, the average ammonia removal efficiency steadily stayed above 99%. Later, using the nitrification biofilm and the activated sludge that enriched of DPB, the A₂N system was connected for dealing with domestic sewage. After 11 d, the treatment effect of A₂N system attained steady. The total nitrogen and phosphorus concentration of effluent are 0, the nitrate concentration is 10.26 mg/L, and COD is 19.56 mg/L. The removal efficiency of COD, ammonia, total nitrogen and phosphorus are 91%, 100%, 77% and 100%, respectively. Each result shows that the A₂N system is started up successfully.

Key words: denitrifying phosphorus removing bacteria (DPB); A₂N two-sludge system; sequencing batch reactor (SBR); cultivation; fast startup

污水脱氮除磷是防止水体富营养化问题的有效途径之一, 生物脱氮和生物除磷在污水处理中通常被结合起来. 以前认为, 聚磷只能在好氧环境下进行, 最近一些研究表明, 至少存在一部分聚磷菌可以在缺氧条件下利用硝酸盐作为电子受体进行吸磷^[1,2]. Kern-Jespersen 等^[3]认为聚磷菌可以分为两类, 一类只可以利用氧作为电子受体, 另一类可以利用氧或者硝酸盐为电子受体. 因此, 利用反硝化聚磷菌在缺氧条件下的反硝化聚磷特性可同时完成脱氮

和除磷, 解决了反硝化细菌和聚磷菌对碳源需要的矛盾^[4~10]. A₂N 双污泥反硝化除磷工艺就是利用这一原理兴起的能够同时脱氮除磷的新工艺^[11], 它的特点主要有: ①“一碳两用”, COD 在厌氧段被最大

收稿日期: 2007-08-22; 修订日期: 2007-09-22

基金项目: 北京市科委国际合作项目 (50521140075); 北京市属市管高等学校人才强教“创新团队”项目; 国家自然科学基金海外青年学者合作研究基金项目 (50628808)

作者简介: 杨庆娟 (1983 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制工程及水环境恢复, E-mail: yqj@emails.bjut.edu.cn
* 通讯联系人, E-mail: wsy@bjut.edu.cn

限度地用于合成 PHB,在缺氧环境中这部分 PHB 被反硝化聚磷菌同时用于反硝化和吸磷,能够同时节省能源和碳源并有效减少剩余污泥量,故该工艺适宜处理城市生活污水这样低碳氮比的污水;②“双泥”,即该系统有 2 套污泥系统:含有 DPB 的活性污泥与好氧硝化生物膜,它们独立于 2 个不同的系统中使之分别在最适宜的环境下生长,解决了传统工艺中聚磷菌和硝化细菌的竞争矛盾,使除磷和脱氮更易达到稳定高效可控^[4, 12-15]。

由于 A₂N 系统的这种与众不同的特点,如果系统的启动直接采用连续运行的方式,“双泥”不能够在各自最佳环境下生长,势必延长启动时间.为了减少培养反硝化聚磷菌和好氧硝化生物膜以及 A₂N 系统启动的时间,先用生活污水,以 SBR 间歇运行的方式培养反硝化聚磷菌和好氧硝化生物膜,使之在较适宜的条件下和较短的时间内迅速生长,然后再将反硝化聚磷污泥和好氧硝化生物膜放入 A₂N 系统中连续运行^[16, 17]. 本试验研究了反硝化聚磷菌和好氧硝化生物膜的单独培养驯化及 A₂N 系统的

启动和稳定运行,对合理有效地进行工艺设计和控制具有参考意义.

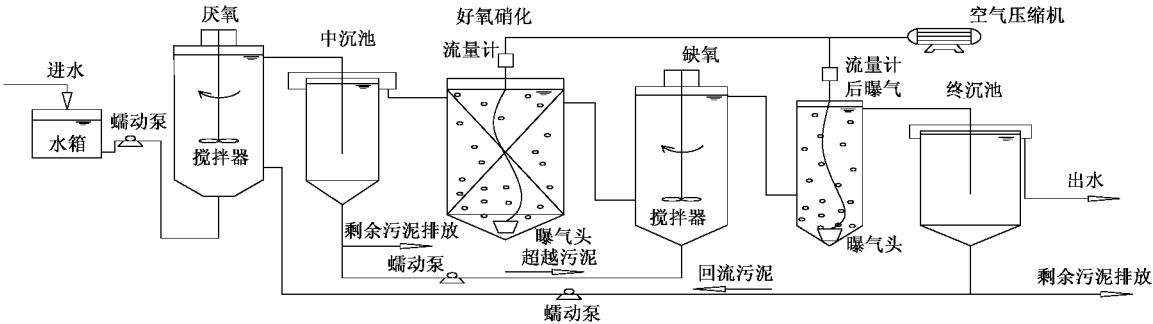
1 材料与方法

1.1 试验设备与试验用水

反硝化聚磷菌的培养是在 SBR 反应器中进行的,该反应器高 70 cm,直径 20 cm,为有机玻璃制成,底部泥斗为圆锥形,总有效容积为 12 L.反应器设有搅拌器,其作用是在厌氧和缺氧阶段通过搅拌使活性污泥处于悬浮状态.

A₂N 连续流双污泥反硝化除磷系统的结构如图 1 所示.由厌氧池、中间沉淀池、好氧生物膜硝化池、缺氧池、后置快速曝气池和终沉池组成,它们的容积分别为 6、5.5、13、10、2 和 7.5 L.其中,好氧生物膜硝化池采用碳纤维和瑞琪填料为介质,其他反应池均采用活性污泥法,体现了该工艺“双污泥”的概念.

试验用水采用的是某高校生活区排放的实际生活污水,其水质情况见表 1.



超越污泥:指超越好氧硝化生物膜反应器,从中沉池回流到缺氧池的污泥;回流污泥:指从终沉池回流到厌氧池的污泥

图 1 A₂N 连续流双污泥反硝化除磷工艺流程

Fig.1 Schematic diagram of A₂N system

表 1 试验用水水质

Table 1 Characteristics of influent wastewater

项目	COD /mg•L ⁻¹	BOD ₅ /mg•L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg•L ⁻¹	TN /mg•L ⁻¹	PO ₄ ³⁻ -P /mg•L ⁻¹	pH	碱度
最小值~最大值	105~453	100~350	21.89~61.11	22.69~62.33	3.75~11.9	6.8~7.5	340~400
平均值	285	189	50.82	52.26	4.55	7.2	360

1.2 检测方法^[18]

COD: 重铬酸钾法;氨氮: 纳氏试剂分光光度法;硝态氮: 麝香草酚分光光度法;TN: 过硫酸钾氧化-紫外分光光度法;TP: 氯化亚锡还原光度法;溶解性磷酸盐: 氯化亚锡还原光度法;MLSS: 滤纸称重法;生

物相: 光学和电子显微镜;DO、温度: WTW DO 测定仪及探头;pH 和 ORP 都为 WTW level 2 型.

1.3 接种污泥与培养运行方式

试验初期将涉及到 2 种菌群的培养驯化,一是好氧硝化生物膜的培养,一是反硝化聚磷菌的培养.

培养生物膜的种泥取自污水处理厂硝化性能较好的沉淀池污泥,培养反硝化聚磷菌的种泥取自北京市高碑店污水处理厂除磷工艺中的活性污泥.

好氧硝化生物膜的培养驯化直接在 A₂N 反应器的以比表面积较大的碳纤维和瑞琪填料为载体的生物膜反应器内进行.其中加入生活污水和种泥,采取间歇进水,快速排泥的方式进行.温度控制在 25℃,溶解氧为 5~6 mg/L,污泥浓度为 3.5 g/L 左右,每天运行 2 个周期,每个周期 12 h.定期检测出水氨氮浓度和用显微镜观察生物相.

根据聚磷菌可以分为两类的理论^[4],以硝酸盐为电子受体的反硝化聚磷菌是聚磷菌中的一部分,所以反硝化聚磷菌的培养驯化分 2 个阶段进行.第一阶段,采取 A/O 方式间歇运行,目的是富集聚磷菌,淘汰其他菌属.在一个容积为 12 L 的 SBR 反应器中,加入种泥和生活污水,厌氧搅拌 4 h,然后曝气 3 h,沉淀排水 30 min,每天运行 3 个周期,定期检测释、吸磷情况和微生物相;第二阶段,采用厌氧/缺氧方式运行,目的是富集利用硝态氮为电子受体的反硝化聚磷菌.在 SBR 反应器内厌氧搅拌 4 h,然后加入一定量的硝态氮(一般为 KNO₃),缺氧搅拌 3 h,沉淀排水 30 min,每天运行 3 个周期,定期检测释、吸磷情况和微生物相.

好氧硝化生物膜和反硝化聚磷污泥培养成熟后,将反硝化聚磷污泥注入 A₂N 连续流双污泥反硝化除磷系统中,开始系统的启动. A₂N 连续流双污泥反硝化除磷系统启动期间的运行参数是:反应器的运行流量为:47.8 L/d; MLSS 控制在 3 000~4 000 mg/L;生物膜硝化池和后置快速曝气池的溶解氧分别控制在 4~5 mg/L 和 1~2 mg/L;由于启动期间硝态氮的出水含量不太稳定,为避免大量的硝态氮回流到厌氧池影响释磷,控制回流污泥回流比为 30%,出于平衡性的考虑,将超越污泥回流比也调至 30%;启动期间温度控制在 22~25℃.

2 结果与分析

2.1 好氧硝化生物膜的培养驯化

好氧硝化生物膜培养驯化期间氨氮的变化情况如图 2 所示.

从图 2 曲线变化可以看出,培养驯化最初时氨氮的去除率仅为 50.5%,在第 20 d 时氨氮的去除效果接近稳定,随后的 10 d 里去除率一直稳定在 99% 以上.经过 30 d 的驯化培养,氨氮的去除效果达到稳定高效,并且在填料表面形成了一层致密的可以

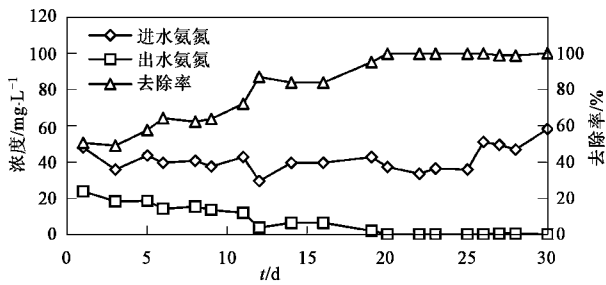


图 2 好氧硝化生物膜培养期间氨氮的变化
Fig.2 NH₄⁺-N influent and effluent concentration and removal rate during the period of cultivation

用肉眼观察到的生物膜絮体,证明生物膜培养成熟.

2.2 反硝化聚磷菌的培养驯化

2.2.1 第一阶段

第一阶段在厌氧/好氧条件下间歇进行,富集以氧为电子受体的好氧聚磷菌.图 3 反映了第一阶段开始后几个典型周期磷浓度变化情况.

第一阶段的第 2 d,体系中磷浓度在厌氧和好氧结束后分别为 10.37 mg/L 和 2.77 mg/L. 7.6 mg/L 的磷在好氧条件下被吸收,这说明接种污泥本身就具有一定的好氧吸磷性能.第 5 d、8 d,在进水磷浓度基本不变的情况下,厌氧放磷逐步增加,好氧吸磷量由 8.32 mg/L 增加到 12.83 mg/L,第 12 d 厌氧放磷量为 17.45 mg/L,释放的磷在好氧过程中被全部吸收,说明以氧为电子受体的聚磷菌已经成为活性污泥体系中的优势菌属^[19].

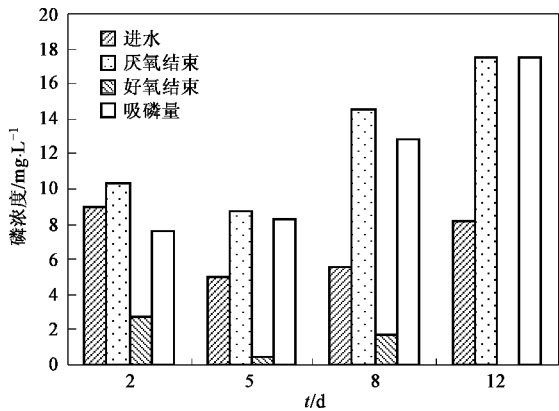


图 3 进水、厌氧、好氧结果磷浓度及吸磷量变化
Fig.3 PO₄³⁻-P concentration and absorptivity after influent, anaerobic and aerobic condition

2.2.2 第二阶段

活性污泥经过第一阶段培养驯化,聚磷菌在活性污泥体系中的比例大大增加,已经具备了很好

的好氧吸磷性能. 随后进入第二阶段, 改用厌氧/缺氧的方式间歇运行, 厌氧结束后投加硝酸盐作为电子受体, 富集以硝态氮为电子受体的反硝化聚磷菌.

图 4 反映了第二阶段开始后几个典型周期磷浓度的变化情况. 第二阶段的第 3 d, 厌氧结束和缺氧结束后的磷浓度分别为 11.7 mg/L 和 7.7 mg/L. 4 mg/L 的磷在缺氧环境下被吸收, 说明活性污泥系统中本身存在着反硝化聚磷菌, 也证明了聚磷菌分为两类, 其中一类可以利用硝酸盐作为电子受体进行反硝化吸磷^[4].

第 7、11、15 d, 厌氧放磷量和缺氧吸磷量都不断增加, 缺氧吸收的磷从第 7 d 的 5.85 mg/L 增加到第 15 d 的 26.08 mg/L, 说明在缺氧段越来越多的磷被聚磷菌在反硝化的过程中同时吸收. 第 20 d, 厌氧释磷和缺氧吸磷量比第 15 d 略有提高, 说明经过 20 d 的培养驯化, 厌氧/缺氧交替环境下的反硝化除磷系统进入了稳定状态, 以硝态氮为电子受体的反硝化聚磷菌已经成为优势菌属, 具有了很好的反硝化除磷效果.

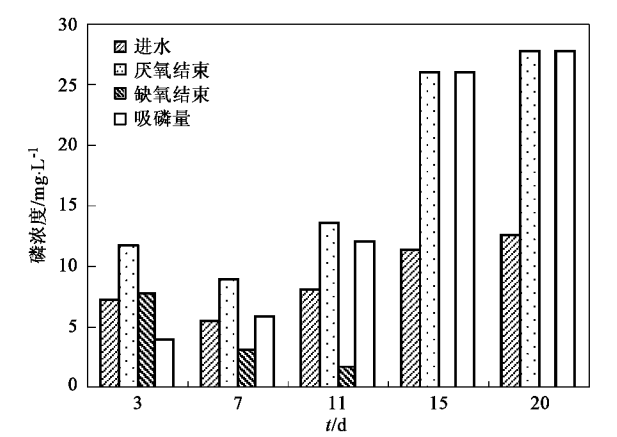


图 4 进水、厌氧、缺氧结束磷浓度及吸磷量变化
Fig.4 PO_4^{3-} -P concentration and absorptivity after influent, anaerobic and anoxic condition

2.3 A_2N 双污泥反硝化除磷系统的快速启动

硝化生物膜与反硝化聚磷菌培养成熟后, 将反硝化聚磷污泥注入 A_2N 系统中, 采用连续进水的运行方式处理生活污水. 启动期间 COD、氮、磷变化如图 5 所示.

从图 5 氮磷去除率的变化曲线可见, A_2N 系统连续运行初期, 氨氮和 COD 去除率均高于 80%, 但低于 90%; 磷去除率在 80% 左右; 由于硝态氮剩余量较大, 总氮去除率很低. 这反映出反应器运行初期, 由于前期培养的反硝化聚磷菌和好氧硝化生物

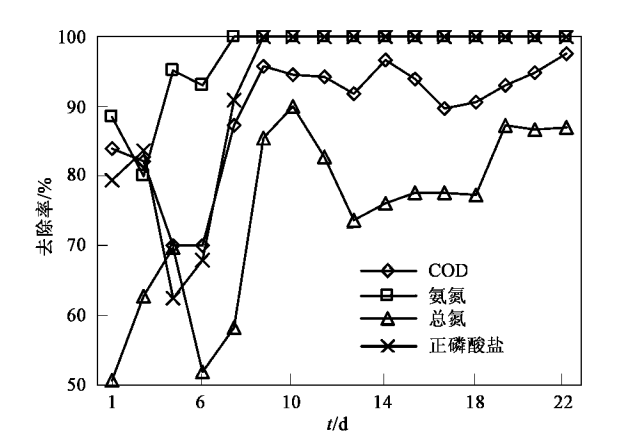


图 5 系统启动期氮磷去除率
Fig.5 NH_4^+ -N and PO_4^{3-} -P removal rate during the period of start-up

膜生长的条件发生了变化, 由单独培养变成连续培养, 微生物对新的环境不适应表现出的对有机物及氮磷去除率不高. 经过 11 d 的培养后, 氮磷去除率都稳定在 95% 以上, COD 去除率稳定在 90% 以上, 总氮去除率平均为 81.52%. 这是因为经过单独的驯化培养, 系统中的污泥已经具有了良好的反硝化除磷能力, 在缺氧池中反硝化聚磷菌利用过量的硝态氮为电子受体过量吸磷, 使得磷的去除率一直很高. 该系统中总氮主要是氨氮和硝态氮, 由于回流污泥和超越污泥回流比均为 30%, 也就是说少量的氨氮超越生物膜系统进入缺氧池, 剩余大部分氨氮都进入硝化池转变为硝态氮进入缺氧池. 由于生物膜硝化池的已经具有了良好的硝化能力, 氨氮几乎全部转化为硝态氮. 由于启动初期氮磷比例的不稳定导致了缺氧池中磷能够完全去除, 而硝态氮有所剩余.

图 6 是系统运行稳定后的一个典型运行周期内各反应池中 COD、氨氮、正磷酸盐、硝氮及总氮的变化规律. 在这一典型周期内, 进水 COD、氨氮、正磷酸盐和硝氮浓度分别为 207.6、51.02、3.96 和 0.97 mg/L. 终沉池回流的污泥中含有大量的充分吸磷的聚磷菌, 在厌氧反应器内将进水中的有机物转化为 PHB 储存在体内, 同时大量释磷, COD 利用量占 COD 总降解量的 68.8%, 在中沉池释磷量达到最大为 24.35 mg/L. 经中沉池分离上清液中的氨氮在生物膜反应器内被充分硝化, 硝化率为 100%, 硝化液和超越硝化池的释磷污泥一起进入缺氧反应器, 反硝化聚磷菌利用硝态氮为电子受体, 体内储存的 PHB 为电子供体进行反硝化吸磷. 未吸收完全的磷

在后置快速曝气池中被进一步好氧吸收.出水氨氮和正磷酸盐浓度均为 0,硝态氮为 10.26 mg/L,出水 COD 为 19.56 mg/L, COD、氨氮、总氮和磷去除率分别为 91%、100%、77%和 100% .

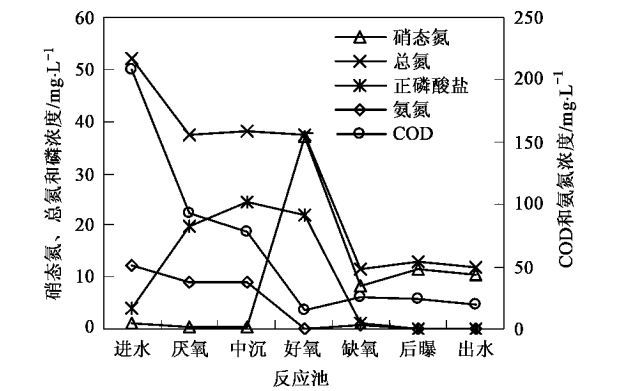


图 6 一个典型周期内各指标的变化规律

Fig.6 Mass concentration of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, COD, NO_x^- , $\text{NH}_4^+\text{-N}$ during a cycle

经过 32 d 的反硝化聚磷菌和好氧生物膜的单独驯化培养和 11 d 的 A₂N 系统的连续运行,系统反硝化除磷效果已经稳定.至此,认为反硝化聚磷污泥驯化富集完成,A₂N 连续流双污泥反硝化除磷系统启动成功.A₂N 系统能够快速启动的原因是:首先,培养反硝化聚磷菌所用的种泥取自污水厂除磷工艺中的沉淀池污泥,其本身就含有聚磷菌,这对于在较短时间内实现反硝化聚磷菌的培养富集很有利.第二,反硝化聚磷菌和好氧生物膜单独培养有利于 2 种微生物在各自适宜的环境下生长,生长速度快于将它们连接起来培养.厌氧环境起到了“生物选择器”的作用,厌氧/好氧和厌氧/缺氧交替的环境有利于聚磷菌和反硝化聚磷菌的富集.连续运行后,反硝化聚磷菌需要的厌氧/缺氧环境被进一步强化,DNPAOs 微生物可形成稳定的优势菌属.

3 结论

(1)在 SBR 反应器内,采用先厌氧/好氧(A/O),后厌氧/缺氧(A/A)的运行方式对驯化培养污泥的反硝化聚磷效果有很好的强化作用,在 32 d 的时间里迅速达到了反硝化聚磷菌的培养富集;采用快速排泥的方式,在 1 个月的时间里,好氧硝化生物膜培养成功.A₂N 系统连续运行后,反硝化聚磷菌需要的厌氧/缺氧环境被进一步强化,在 11 d 的时间里,系统成功地快速启动.

(2)A₂N 连续流双污泥反硝化除磷系统具有很

好的脱氮除磷效果,在稳定运行的基础上, COD、氨氮、总氮和磷去除率分别为 91%、100%、77% 和 100%,出水氨氮和正磷酸盐浓度均为 0,硝态氮为 10.26 mg/L,出水 COD 为 19.56 mg/L,是一种很有发展前途的能够节能降耗并同时脱氮除磷的新工艺.

参考文献:

[1] Lee D S, Jeon C O, Park J M. Biological nitrogen removal with enhanced phosphate uptake in a sequencing batch reactor using single sludge system [J]. Wat Res, 2001, 35(16): 3968-3976.

[2] 王晓莲,王淑莹,马勇,等. A²O 工艺中反硝化除磷及过量曝气对生物除磷的影响[J]. 化工学报, 2005, 56(8): 1565-1570.

[3] Kerm-Jespersen J P, Henze M. Biological phosphorus uptake under anoxic and aerobic condition [J]. Wat Res, 1993, 27(4): 617-624.

[4] Kuba T, Van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Phosphorus and nitrogen removal with minimal COD requirement by integration of denitrifying dephosphatation and nitrification in a two-sludge system [J]. Wat Res, 1996, 30(7): 1702- 1710.

[5] 罗宁, 罗固源, 吉芳英,等. 新型双泥生物反硝化除磷脱氮系统中微生物的组成[J]. 给水排水, 2003, 29(8): 33-35.

[6] Merzouki M, Bernet N, Delgenes J P, et al. Biological denitrifying phosphorus removal in SBR: effect of added nitrate concentration and sludge retention time [J]. Wat Sci Tech, 2001, 43(3): 191-194.

[7] 王春丽, 马放, 刘慧,等. 反硝化聚磷菌株分离筛选方法的研究[J]. 吉林建筑工程学院学报, 2006, 23(3): 5-8.

[8] Barker P S, Dold P L. Denitrification behaviour in biological excess phosphorus removal activated sludge system[J]. Wat Res, 1996, 30(4): 769-780.

[9] 王亚宜,彭永臻,王淑莹,等. 反硝化除磷理论、工艺及影响因素[J].中国给水排水,2003, 19(1):33.

[10] Bortone G, Marsili Libelli S, Tilche A, et al. Anoxic phosphate uptake in the DEPHANOX process [J]. Wat Sci Tech, 1999, 40(4-5): 177-185.

[11] 罗固源, 罗宁, 吉芳英,等. 新型双泥生物反硝化除磷脱氮工艺[J]. 中国给水排水, 2002, 18(9): 4-7.

[12] Kuba T, Smolders G, van Loosdrecht M C M, et al. Biological phosphorus removal from wastewater by anaerobic-anoxic sequencing batch reactor [J]. Wat Sci Tech, 1993, 27(5-6): 241-252.

[13] Merzouki M, Bernet N, Delgenes J P, et al. Biological denitrifying phosphorus removal in SBR: effect of added nitrate concentration and sludge retention time [J]. Wat Sci Tech, 2001, 43(3): 191-194.

[14] 吴广华,张耀斌,全燮.温度及反硝化聚磷对 SBMBBR 脱氮除磷的影响[J]. 环境科学,2007,28(11):2484-2487.

[15] 王亚宜,王淑莹,彭永臻,等. MLSS、pH 及 NO₂⁻-N 对反硝化除磷的影响[J]. 中国给水排水, 2005, 21(7): 47-51.

[16] 李勇智,王淑莹,吴凡松,等. 强化生物除磷体系中反硝化聚磷菌的选择与富集[J]. 环境科学学报, 2004, 24(1): 45-49.

[17] Zeng R J, Saunders A M, Yuan Z, et al. Identification and comparison of aerobic and polyphosphate 2 accumulating organisms [J]. Biotech Bioeng, 2003, 83(2): 140-148.

[18] 国家环保局. 水和废水监测分析方法[M]. (第三版). 北京: 中国环境科学出版社, 1989. 252-356.

[19] 竺建荣,刘纯新,何建中,等. 厌/好氧交替工艺的生物除磷特性研究[J]. 环境科学学报, 1999, 19(4): 394-398.