

两级生物选择同步除磷脱氮新工艺

田文德¹,李伟光^{1,2*},张 卉¹,郭 旋¹(1.哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150090; 2.哈尔滨工业大学城市水资源开发利用(北方)国家工程研究中心,黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 针对现有市政污水处理工艺难以兼顾同时生物脱氮除磷的矛盾,结合生活污水低碳氮比的特点,通过在传统的 A/O 工艺的基础上增设了 1 个厌氧选择器以提供生物释磷最适宜环境,1 个缺氧选择器以避免回流污泥中硝酸盐对厌氧释磷影响以及防止污泥膨胀,开发了一种新型的 2 级生物选择同步除磷脱氮新工艺.研究表明,应用 2 级生物选择反硝化除磷脱氮工艺处理生活污水,当进水 COD/TN=4.4, COD/TP=33 的情况下,稳定期的 COD、氨氮、总磷的去除效率分别可达到 88%、90%和 97%,出水水质达到了国家《城镇污水处理厂污染物排放标准》的一级 A 标准,反硝化除磷量占总除磷量的 35%,并且缺氧段硝酸盐量和缺氧吸磷量成明显的线性关系,平均每消耗 1mgNO₃⁻-N 约吸收 1.8mgTP,此线性关系可作为本工艺反硝化除磷的一个重要控制参数.

关键词: 生物选择器; 反硝化除磷; 反硝化聚磷菌; 缺氧吸磷

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2012)02-0221-05

Bi-bio-selective simultaneous phosphorus and nitrogen removal (BBSPN) novel process. TIAN Wen-de¹, LI Wei-guang^{1,2*}, ZHANG Hui¹, GUO Xuan¹ (1.State Key Laboratory of Urban Water Resource Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. National Engineering Research Center of Urban Water Resources, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China). *China Environmental Science*, 2012,32(2): 221~225

Abstract: The current municipal wastewater treatment processes are difficult to remove nitrogen and phosphorus simultaneously, especially for domestic wastewater characterized with low C/N. Based on traditional A/O process, a novel Bi-bio-selective simultaneous phosphorus and nitrogen removal (BBSPN) process was developed through adding two-stage biological selectors before A/O process. An anaerobic selector was adopted to provide the most appropriate environment for biological phosphorus release; an anoxic selector was added to avoid nitrate of return sludge influencing phosphorus release and to prevent filamentous bulking. The removal efficiency of COD, ammonia nitrogen and total phosphorus was 88%, 90% and 97% in the steady-state under the condition of influent COD / TN = 4.4, COD / TP = 33. The effluent qualities can achieve Grade A standard of 'urban sewage treatment plant emission standards'. Hereto, 35% of total phosphorus was removed by denitrifying dephosphatation. Moreover, the linear relationship between nitrate and anoxic phosphorus uptake in anoxic compartment was established. 1mg NO₃⁻-N consumption corresponds to 1.8mg P-uptake, which can be used as a key controlling parameter for this novel denitrifying dephosphatation process.

Key words: biological selector; denitrifying dephosphatation; denitrifying phosphorus removal bacteria (DPB); anoxic phosphorus uptake

传统的生物脱氮除磷工艺在处理低碳源的生活污水时常常存在着以下矛盾:反硝化细菌和聚磷菌对碳源的竞争;硝化菌与聚磷菌间污泥龄的矛盾;前置反硝化脱氮除磷工艺回流污泥中硝酸盐对厌氧释磷干扰^[1].因此,一直很难实现污水同步脱氮除磷.直到 Kuba 等^[2]在厌氧/缺氧交替运行的条件下,发现了一种反硝化除磷菌(DPB),其兼有反硝化和聚磷双重作用,能以硝酸盐作为

最终电子受体,利用内碳源聚 β-羟基丁酸酯(PHB)既作为反硝化除磷聚的碳源又作为储能物质,通过代谢作用,实现同时反硝化和吸磷,不但可节省 50%的碳源需求,还降低了 30%需氧量,同时减少 50%的剩余污泥产量,也减少了二氧化

收稿日期: 2011-06-23

基金项目: 国家“水专项”(2009ZX07317-008-01)

* 责任作者, 教授, hittwd@gmail.com

碳的排放^[2-4],为低碳源的城市生活污水处理提供了新的思路.因此,反硝化除磷工艺被公认为“可持续的生物除磷脱氮工艺”^[5-6].

鉴于日益严格的污水排放标准,国内大多数污水处理厂都面临着升级改造,而其中又以A/O、A₂O型为主导,研发一种既便于原有水厂升级改造,又可用于水厂新建的高效低耗的污水处理工艺,具有较高的应用价值.本研究以反硝化除磷理论为基础,在传统的A/O工艺的基础上增加了1个厌氧选择器和1个缺氧选择器,构建了2级生物选择同步除磷脱氮新工艺,解决了前置反硝化型工艺硝酸盐回流对厌氧释磷的影响以及可抑制污泥膨胀^[7],同时使得可利用的碳源充分被用于厌氧释磷,好氧末段投加悬浮生物填料以解决硝化细菌和聚磷菌世代周期之间的矛盾^[8-9].

并以实际生活污水为处理对象,研究了本工艺反硝化除磷脱氮的性能,旨在为该工艺的实际应用奠定基础.

1 材料与方法

1.1 试验装置

2级生物选择同步除磷脱氮反应器如图1所示.反应器由有机玻璃制成,总有效容积为27L,其中由移动插板分隔成厌氧选择器、缺氧选择器、缺氧池、好氧池1和好氧池2等5部分,所占有的有效容积分别为5.4,1.2,6.6,7.8,6L.沉淀池的体积为9L.厌氧区和缺氧区使用电动搅拌机搅拌混合,好氧区使用空压机提供氧气,使用流量计控制其流量.好氧2投加1.8L填料,其比表面积为380~800m²/m³,孔隙率大于99%,比重0.93.

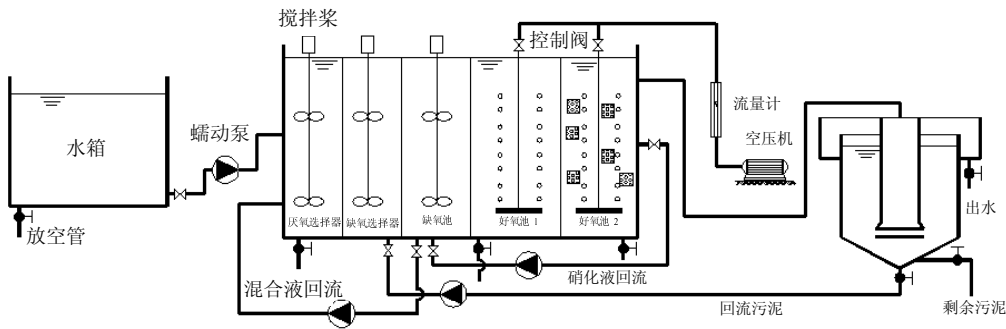


图1 两级生物选择同步除磷脱氮工艺示意
Fig.1 Schematic diagram of BBSPN process

1.2 试验水质

试验用水取自哈尔滨工业大学二校区教工家属区生活污水,根据试验需要加入一定的KH₂PO₄以调节污水中的磷含量,调整后的实验用水如表1所示.

表1 废水水质

Table 1 Wastewater characteristic

参数	COD (mg/L)	BOD ₅ (mg/L)	NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	pH 值
范围	183.5~ 367	95.6~ 210.4	46.3~ 62.5	48.6~ 71.5	5.3~ 10.9	7.0~ 7.7
均值	259.6	120.6	53.9	59.6	7.7	7.3

1.3 检测项目及方法

COD_{cr}、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、TN、TP、MLSS 均按照国家标准测定^[10],温度和DO采用SG6-ELK便携式溶氧仪测定,ORP和pH值采用意大利哈纳HANNA HI8424便携式酸度计测定.

应用莫诺方程式对缺氧池进行物料平衡,得到缺氧池TP去除量计算公式^[11]:

$$C_n = \frac{Q_{in}C_{on} + Q_rC_r}{Q_{in} + Q_r} - C_{en} \tag{1}$$

式中: C_n为缺氧池TP去除量,mg/L;Q_{in}为缺氧池进水流量,L/h;Q_r为硝化液回流量,L/h;C_{on}为选择池末端TP质量浓度,mg/L,C_r为好氧池2末端TP质量

浓度,mg/L; C_{en} 为缺氧池末端 TP 质量浓度,mg/L.

好氧区 TP 去除量计算公式为:

$$C_o = C_{\text{en}} - C_{\text{eo}} \quad (2)$$

式中: C_o 为好氧池 TP 去除量,mg/L; C_{en} 为缺氧池末端 TP 质量浓度,mg/L; C_{eo} 为好氧池 2 末端 TP 质量浓度,mg/L.

1.4 试验方法

接种污泥取自哈尔滨文昌污水处理厂(A/O 工艺)二沉池回流污泥,种泥沉降性能很好,SV 约 30%,氨氮去除效率 85%左右,但是除磷效率偏低,约 75%.加入营养物质后闷曝 2d,接种至 2 级生物选择同步除磷脱氮反应器中.反应器的进水、污泥回流、硝化液回流和混合液回流均通过兰格 Z1515-M 型蠕动泵控制.设置进水流量 3L/h,污泥回流比 100%,硝化液回流比 200%,缺氧池到厌氧选择器的混合液回流比 150%,MLSS 约 3000mg/L,好氧池的 DO 维持 1.5~2mg/L,污泥龄为 15d.

2 结果与讨论

2.1 系统对有机物的去除

图 2 可见,经过近 1 个月的启动,系统达到了稳定,综合启动期和稳定期的实验数据,当试验中进水的 COD 平均 239.06mg/L,出水 COD 平均 27.30mg/L,平均去除率为 88.42%,尽管系统对 COD 的去除表现基本稳定,稳定期后的去除率仍有所提高,达到了 90%.李洪静等^[11]在研究丙酸/乙酸对低氧生物除磷系统影响时,最高 COD 去除效果为 83%,说明本实验使用的污水中丙酸/乙酸比例以及溶解氧没有影响 COD 的去除.由于本系统的 2 个生物选择器的设置,有机物主要在厌氧阶段充分被用来充分释磷和贮存 PHB,确保缺氧段聚磷菌体内有足够的贮存物作为电子供体实现反硝化吸磷,所以系统对 COD 的去除主要是在厌氧选择器中,再加之缺氧选择器中一部分 COD 被用于反硝化回流污泥中携带的硝酸盐氮,使得进入到缺氧池中的 COD 在 50mg/L 左右,此结果与罗固源等^[12]利用螺旋式升流式反应器得出的结论一致.缺氧池 COD 过高,异氧反硝化细菌会和反硝化聚磷菌竞争外碳源优先进行反硝化作用,耗尽硝酸盐而影响其作为反硝化除磷

的电子受体,从而抑制反硝化除磷菌,相反,较低的 COD 有利于反硝化聚磷菌以硝酸盐为电子受体,利用内碳源 PHB 反硝化除磷和脱氮同时进行,达到“一碳两用”的目的,也节省了一部分曝气的动力消耗.因此在本系统中,缺氧池中 COD 不影响反硝化除磷的效果,并保持进入后续好氧段的 COD 比较稳定,使得好氧段的溶解氧不会经常波动,为硝化细菌的生存环境提供了良好的保证.

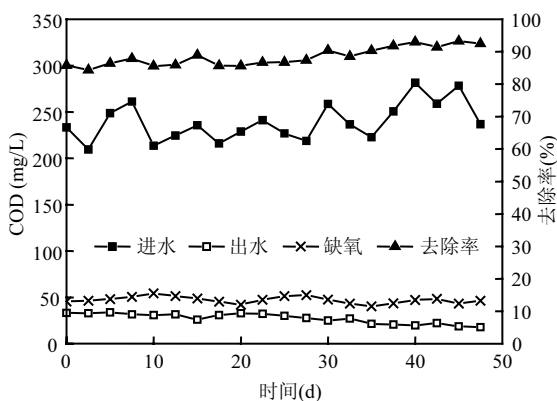


图 2 系统对 COD 的去除效果

Fig.2 COD removal performance in BBSPN process

2.2 系统对氨氮的去除

由图 3 可见,进水氨氮平均浓度为 51.37mg/L,在系统启动的前期,氨氮的去除率约 78%,随着系统逐步趋于稳定,氨氮的去除率稳步上升,当系统中的硝化细菌增长起来以后进入稳定期,30d 后氨氮的去除率显著提升,平均去除率为 90%.

系统好氧段由 2 部分组成,当缺氧出水的 COD 高的时候,好氧池 1 可以承受一定的有机物冲击负荷;好氧池 2 加入悬浮生物填料以保证硝化细菌有足够的世代时间,更好的进行硝化作用,为缺氧段提供可持续的反硝化电子受体.稳定期系统缺氧段的溶解氧基本保持在 1.5~2.0mg/L,好氧池 2 出水平均的硝酸盐氮为 6.7mg/L,缺氧池出水的硝酸盐氮低于 2.0mg/L,此时缺氧池混合液回流也未影响厌氧选择器的释磷情况,与王晓莲等^[13]、Yuan 等^[14]研究结果一致.较低的缺氧出水硝酸盐浓度也说明了 200%硝化液回流在此运行参数下可满足缺氧池对反硝化电子受体的要

求。硝化液回流比对于反硝化除磷工艺尤为重要,并不是硝酸盐量越高,反硝化吸磷的效果越好,正如陈洪斌等^[15]在倒置 A²O 工艺研究中发现较高的回流硝酸盐量会抑制缺氧段的吸磷性能。

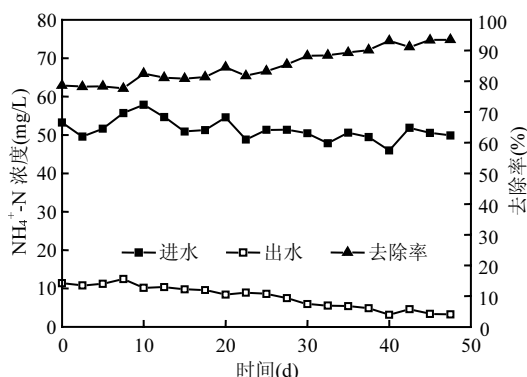


图3 系统对氨氮的去除效果

Fig.3 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal performance in BBSPN process

2.3 系统对 TP 的去除

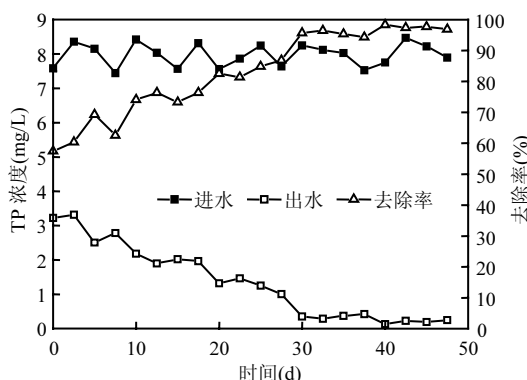


图4 系统对 TP 的去除效果

Fig.4 TP removal performance in BBSPN process

由图 4 可见,系统启动初期由于聚磷菌和反硝化除磷菌都在驯化阶段,除磷效果不是很好,但是随着聚磷菌和反硝化除磷菌的逐渐增多,系统的除磷效果稳步上升,运行 30d 后,去除率从开始约 60%提升到 85%左右,此时系统启动完成,随后进入稳定期,除磷效果明显提高,平均除磷率稳定在 97%,出水 $\text{TP} < 0.5 \text{mg/L}$,达到了《城镇污水处理厂污染物排放标准》^[16]一级 A 标准。

由图 5 可见,从系统启动初期到反应运行稳

定期,进水总磷平均浓度 7.9mg/L 时,厌氧选择器中释磷的比例逐渐增加,由启动期开始的近 3 倍释磷,增加到稳定后期的 4 倍多释磷,释磷效果越好,后续的缺氧和好氧的吸磷动力越大,其吸磷效果越好。缺氧选择器中磷的含量的减少的原因主要是由于污泥回流和混合液回流的稀释作用、微生物的同化作用以及反硝化除磷。缺氧池吸磷的比例也随着系统的稳定而稳步升高,吸磷量从 1.7mg/L 上升到 5.3mg/L ,缺氧吸磷率从 21%上升到 39%,稳定期平均保持在 35%左右,而相对的好氧吸磷率从 79%下降到 61%,这也说明了系统中 35%的总磷是由缺氧段反硝化除磷来完成的。由于缺氧反硝化除磷作用的稳定,大大减少了系统的曝气量和剩余污泥产量。

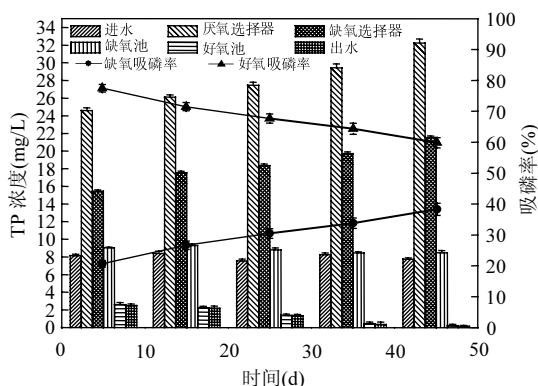


图5 TP 不同时段全流程变化及吸磷率

Fig.5 Variation of TP along the flow path and phosphorus uptake rate

每个阶段内总磷量均为 10d 平均值

缺氧段反硝化除磷中作为电子受体硝酸盐的含量和缺氧吸磷量之间的关系往往是反硝化除磷系统中最关键的因素之一。作为电子受体的硝酸盐不足,可能导致缺氧状态变为厌氧状态,结果是反硝化除磷菌在此发生厌氧释磷,而在硝酸盐过多的情况下,其不但不会加快缺氧吸磷的速率,而且还会使得混合液回流中过高的硝酸盐破坏厌氧选择器的释磷环境,所以,缺氧池中合适比例的硝酸盐氮尤其显得重要。从图 6 可以看出,缺氧段硝酸盐氮量和缺氧吸磷量成明显的线性关系,平均每消耗 $1 \text{mgNO}_3^-\text{-N}$ 约吸收 1.8mgTP ,本试

验结果与 Kern-Jespersen 等^[17]在研究固定生物膜反应器反硝化除磷系统中,缺氧段每消耗 $1\text{mgNO}_3^--\text{N}$ 可吸收 $2.0\text{mg/L PO}_4^{3-}-\text{P}$ 基本一致。

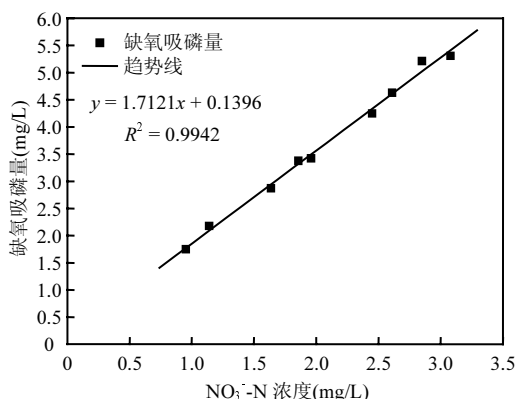


图6 缺氧段 NO_3^--N 量与缺氧吸磷量的关系

Fig.6 Relationship between NO_3^--N and anoxic phosphorus uptake in anoxic compartment

3 结论

3.1 2 级生物选择同步除磷脱氮新工艺通过在传统的 A/O 工艺的基础上增加了 1 个厌氧选择器和 1 个缺氧选择器,可提供稳定可靠的厌氧环境以充分利用碳源进行厌氧释磷,解决了前置反硝化型污水处理工艺污泥回流中硝酸盐对厌氧释磷的影响并可抑制污泥膨胀。

3.2 试验结果表明,该工艺具有稳定的反硝化除磷和脱氮效果,在该系统稳定期进水 $\text{COD}/\text{TN}=4.4$, $\text{COD}/\text{TP}=33$ 的情况下, COD 、氨氮、总磷的去除效率分别可达到 88%、90%和 97%,出水水质达到了我国《城镇污水处理厂污染物排放标准》的一级 A 标准。

3.3 稳定期缺氧段 COD 浓度保持在 50mg/L 左右,未发现反硝化细菌和反硝化聚磷菌之间的竞争而影响反硝化吸磷的效果。当系统硝化液回流 200%,并保持缺氧池末段 NO_3^--N 浓度低于 2.0mg/L 时,系统反硝化吸磷率保持在 35%左右。

3.4 系统中缺氧段硝酸盐量和缺氧吸磷量成明显的线性关系,平均每消耗 $1\text{mgNO}_3^--\text{N}$ 约吸收 1.8mgTP ,所以本线性关系可作为本工艺的反硝化吸磷的一个重要控制参数。

参考文献:

- [1] 曹贵华,黄 勇,潘 杨.常规生物脱氮除磷工艺中问题及对策[J]. 水处理技术,2009,35(3):102-106.
- [2] Kuba T, van M C M Loosdrecht, Heijnen J J. Biological dephosphatation by activated sludge under denitrifying conditions: pH influence and occurrence of a full scale wastewater treatment plant[J]. Water Science and Technology, 1997,36(12):75-82.
- [3] 高景峰,陈冉妮,苏 凯,等.好氧颗粒污泥同时脱氮除磷实时控制的研究[J]. 中国环境科学,2010,30(2):180-185.
- [4] Guo J H, Peng Y Z, Peng C Y, et al. Energy saving achieved by limited filamentous bulking sludge under low dissolved oxygen[J]. Bioresource Technology, 2010,101:1120-1126.
- [5] 郝晓地,汪慧贞,钱 易,等.欧洲城市污水处理技术新概念——可持续生物除磷脱氮工艺(上)[J]. 给水排水,2002,28(6):6-11.
- [6] Hao X D, van Loosdrecht M C M. A proposed sustainable BNR plant with the emphasis on recovery of COD and phosphate[J]. Water Science and Technology, 2009,48(1):77-85.
- [7] van Loosdrecht M C M, Brandse F A, de Vries A C. Upgrading of wastewater treatment processes for integrated nutrient removal—the BCFS® process[J]. Water Science and Technology, 1998, 37(9):209-217.
- [8] 张 波,高廷耀.倒置 A^2O 工艺的原理与特点研究[J]. 中国给水排水,2000,16(7):11-15.
- [9] 吴昌永,彭永臻,彭 轶,等. A^2O 工艺中的反硝化除磷及其强化[J]. 哈尔滨工业大学学报,2009,41(8):47-49.
- [10] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法[M]. 4 版.北京:中国环境科学出版社,2006.
- [11] 李洪静,陈银广,顾国维.丙酸/乙酸对低能耗生物除磷脱氮系统的影响[J]. 中国环境科学,2008,28(8):673-678.
- [12] 罗固源,张瑞雪,王丹云,等. SUFR 系统进水 COD 浓度对反硝化除磷的影响[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2005,28(1): 121-125.
- [13] 王晓莲,王淑莹,马 勇,等. A^2O 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.
- [14] Yuan Z, Oehmen A, Pernille Ingildsen. Control of nit rate recirculation flow in predinit rification systems[J]. Water Science and Technology, 2002,45(4/5):29-36.
- [15] 陈洪斌,唐贤春,何群彪,等.倒置 AAO 工艺聚磷微生物的吸磷行为[J]. 中国环境科学,2007,27(1):49-53.
- [16] GB 18918-2002 城镇污水处理厂污染物排放标准[S].
- [17] Kern-Jespersen J P, Henze M. Biological phosphorus uptake under anoxic and aerobic conditions[J]. Water Research, 1993, 27(4):617-624.

作者简介: 田文德(1981-),男,吉林长春人,哈尔滨工业大学市政与环境工程学院博士研究生,研究方向为水污染控制与环境微生物技术.发表论文 7 篇。