

改进分段进水 A/O 生物脱氮工艺强化生物除磷

王伟, 彭永臻, 殷芳芳, 王淑莹

(北京工业大学北京市水质科学与水环境恢复重点实验室, 北京 100124)

摘要:采用分段进水 A/O 中试处理系统处理低 C/N 生活污水, 为实现同步脱氮除磷, 对分段进水 A/O 工艺进行改进并对改进前后系统的脱氮除磷效率进行评价. 改进前分段进水 A/O 工艺平均 TN 去除率为 66.52%, TP 去除率为 29.74%; 改进后的分段进水 A/O 工艺不仅可以稳定地实现同步脱氮除磷, 在三段进水比为 0.45:0.35:0.20 时, 系统平均 TP 去除率达 89.81%, 且由于反硝化除磷的强化节省部分碳源, TN 去除率达 73.61%, 比改进前提高 7.09%. 为验证不同阶段聚磷菌及反硝化聚磷菌在系统内的选择增殖情况, 试验对不同运行阶段的活性污泥进行静态厌氧放磷、好氧及缺氧吸磷试验, 结果表明, 工艺经过改进后, 聚磷菌及反硝化聚磷菌均得到较大程度地选择富集. 采用改进工艺, 污泥最大比好氧吸磷速率 $[P/(MLSS \cdot t)]$ 由 2.34 mg/(g·h) 提高到 10.67 mg/(g·h), 最大比缺氧吸磷速率由 0.33 mg/(g·h) 提高到 2.81 mg/(g·h).

关键词:脱氮; 除磷; 反硝化除磷; 分段进水; A/O

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)10-2968-07

Modified Step-feed A/O Biological Nitrogen Removal Process for Enhanced Phosphorus Removal

WANG Wei, PENG Yong-zhen, YIN Fang-fang, WANG Shu-ying

(Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environmental Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: A pilot-scale step-feed A/O system was used to treat low C/N municipal wastewater. To obtain high quality simultaneous nitrogen and phosphorus removal, a modified step-feed A/O system was developed and the nitrogen and phosphorus removal efficiency was evaluated between the original and modified system. The result showed that TN removal efficiency was 66.52% and TP removal efficiency was only 29.24% before the modified configuration was applied. When the modified system was adopted, the satisfied simultaneous nitrogen and phosphorus removal was achieved. TP removal efficiency increased to 89.81% and TN removal efficiency was 73.61% when the optimal feeding ratio (0.45:0.35:0.20) was applied. Compared to the original configuration, TN removal efficiency increased about 7.09% due to the enhanced denitrifying phosphorus removal, which saved the carbon source for denitrification. To evaluate the selection and dominance of polyphosphate-accumulating organisms (PAOs) and denitrifying polyphosphate-accumulating organisms (DNPAOs), batch test was explored to examine the anaerobic phosphorus release, aerobic and anoxic phosphorus uptake. The result showed that both PAOs and DNPAOs were accumulated gradually when the modified system was applied. The maximal aerobic P uptake rate $[P/(MLSS \cdot t)]$ was increased from 2.34 mg/(g·h) to 10.67 mg/(g·h) and the anoxic P uptake rate was increased from 0.33 mg/(g·h) to 2.81 mg/(g·h) when the modified system was operated.

Key words: nitrogen removal; phosphorus removal; denitrifying phosphorus removal; step-feed; A/O

连续流分段进水缺氧/好氧(A/O)是一种高效的污水生物脱氮工艺. 原水多点进入系统, 可省去硝化液内回流设施, 并充分利用原水中有有机碳源进行反硝化, 节省药剂费用; 此外, 多点进水使得系统对溶解氧的需求更加平衡, 并有效避免或降低洪峰流量时污泥被冲刷的危险^[1~5]. 对分段进水 A/O 工艺的诸多研究表明, 其脱氮效率远远高于传统的 A/O 工艺, 且所需能量较小. 但由于工艺结构限制, 分段进水 A/O 工艺通常不能为聚磷菌(PAOs)提供严格的厌氧环境而使得系统不具备除磷功能.

随着污水排放标准的日益严格, 新建及改扩建污水处理厂不仅需要高效脱氮, 且需要同步除磷. 因此, 将生物脱氮与生物除磷合二为一的生物营养物去除(BNR)工艺的研发得到了人们越来越多的关

注. 由于脱氮除磷过程本身存在一定的矛盾, 因此所有的 BNR 工艺开发的共同特征是设置严格的厌氧区, 供聚磷菌吸收基质, 产生选择性增殖^[6~8]. 此外, 通过水流方向、污泥回流及内回流的调整, 避免硝酸盐氮对厌氧环境造成破坏. 许多 BNR 工艺, 如 Bardenpho 系列、A²/O、UCT、MUCT、JHB 工艺等, 便是基于这样的考虑而提出的. 虽然这些工艺一定程度上克服了脱氮和除磷之间的矛盾, 但是, 每一种工艺

收稿日期: 2008-11-09; 修订日期: 2008-12-20

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重点项目(2008ZX07317-007-105, 2008ZX07314-008-01); 北京高校人才强教计划高层次人才资助项目(PHR20090502); 2008 年中韩环境共同技术研究项目

作者简介: 王伟(1979~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为污水生物处理, E-mail: wang_wei2005@emails.bjtu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: pyz@bjtu.edu.cn

的应用及最高处理效率均有一定的局限性,因此,人们寻求高效的脱氮除磷工艺及方法、探索新型生物脱氮除磷机制的工作从未间断过。

本研究正是基于这样的背景,以分段进水 A/O 工艺处理低 C/N 生活污水的大量相关工作作为基础,对分段进水 A/O 工艺进行改进,使得改进后的工艺不仅保留多点进水的诸多优点,还可以为聚磷菌创造良好的厌氧环境,供其选择增殖,提高除磷效率。然而由于生活污水 COD/N 值较低,碳源的限制使得除磷的实现往往需要牺牲一部分脱氮效率。因此,在工艺改进时,考虑了反硝化除磷实现的可能途径,以期利用反硝化除磷的优势,如节省能源(COD 和溶解氧),污泥产率低等^[9,10],使得改进后的工艺,部分或者全部的磷通过反硝化除磷的途径去除掉,实现“一碳两用”,提高系统同步脱氮除磷的效率。试验对比了工艺改进前后系统的氮、磷去除特性,并通过污泥静态分析试验,考察聚磷菌在不同时期的选择增殖情况,全面评价了改进工艺用以强化除磷的可行性。

1 材料与方法

1.1 工艺改进前后介绍

试验所采用的工艺结构如图 1 所示。分段进水 A/O 工艺结构如图 1(a)所示。系统由 3 段组成,每一段包括一个缺氧区和一个好氧区,好氧区由隔板分成 3 个好氧格室。原水分别在 3 个缺氧区进入反应系统,回流污泥回流到系统首端,不设硝酸盐内回流设施。第一段缺氧区(D1)的进水 Q1 主要为回流污泥携带的硝酸盐氮提供反硝化的碳源,混合污水进入第一段好氧区(依次经过 N11、N12、N13)进行硝化

反应,出水进入第二段的缺氧区(D2),第二段进水 Q2 为反硝化提供碳源,以后各段依次类推。由于第 3 段进水 Q3,只经过第 3 段好氧区进行硝化反应,无反硝化条件,若各段硝化反硝化完全,第 3 段进水将在很大程度上决定系统的出水总氮(TN)浓度。

由于分段进水 A/O 工艺中缺氧/好氧交替分布,通常情况下无法形成严格的厌氧区以供聚磷菌吸收基质,增长繁殖,对低 C/N 生活污水更是如此。为达到同步脱氮除磷的目的,且不失分段进水本身的固有优点,对分段进水 A/O 工艺进行改进,改进后的 A²/O 分段进水工艺如图 1(b)所示。系统第 1 段缺氧区之前增设厌氧区,由于回流污泥中通常含有较多的硝酸盐氮,为降低厌氧区的硝酸盐氮负荷,减少硝酸盐氮对厌氧释磷的不利影响,将回流污泥回流到缺氧区首端,而在缺氧区末增加内回流设施,将反硝化之后的污泥回流到厌氧区保证厌氧区污泥浓度,并降低硝酸盐氮对厌氧释磷的影响。该布置形式不仅考虑强化生物除磷,亦考虑反硝化除磷的实现。第 1 段进水 Q1 进入厌氧区,可以为厌氧释磷提供充足的有机基质,聚磷菌将有机底物以 PHA 的形式储存在体内,当缺氧区 D1 有足够的电子受体硝酸盐时,聚磷菌储存的 PHA 可直接作为缺氧吸磷的动力,实现反硝化除磷。第 1 段缺氧区出水进入好氧区进行硝化反应,将第 1 段进水 Q1 中的氨氮转化为硝酸盐氮,同时,聚磷菌还可利用体内残余的 PHA 继续吸磷。硝化后的污水进入第 2 段的缺氧区进行反硝化反应,对于低 C/N 污水,第 2 段缺氧区通常无法实现完全反硝化,因此通常不会出现磷的二次释放,以后各段依次类推。

1.2 试验装置及运行条件

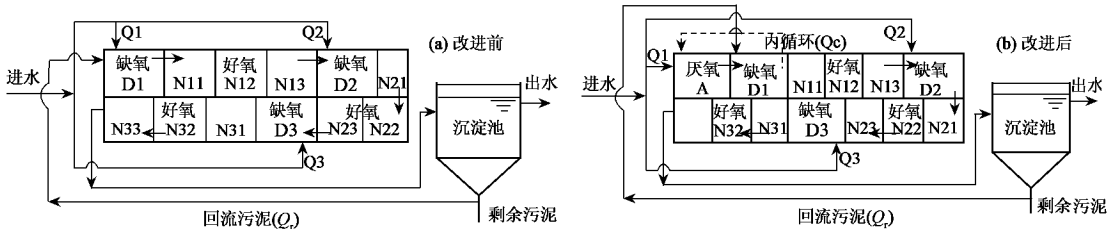


图 1 分段进水 A/O 工艺结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of pilot-scale step-feed A/O system

1.2.1 中试试验运行条件

试验用中试反应器由有机玻璃制成。反应器工作容积为 320 L,共分为 3 个段,20 个格室。二沉池采用竖流式,体积 90L。试验采用 5 台蠕动泵分别控制进水、污泥回流及内回流,采用空压机为系统好氧格

室曝气,鼓风机出口安装空气流量计控制曝气量。采用 4 台电动搅拌机为缺氧区提供搅拌。采用温控仪控制反应池内温度为 22℃。

试验共分为 3 个阶段,第Ⅰ阶段采用图 1(a)所示 3 段进水 A/O 模式运行,第Ⅱ、Ⅲ阶段采用图 1(b)改进

后的 $A^2/O+2$ 段进水 A/O 模式运行.各阶段的运行模式及运行条件如表 1 所示.整个试验期间总进水量 Q 不变,为 960 L/d,相应的总平均水力停留时间(HRT)为 8 h.污泥回流(Q_r)为 $0.6Q$,阶段Ⅱ、Ⅲ

内循环流量(Q_c)为 $0.3Q$.阶段Ⅰ固体停留时间(SRT)为 15 d,阶段Ⅱ、ⅢSRT 为 10 d.系统具体的运行参数详见表 1.

1.2.2 污泥和污水组成

表 1 试验设计及运行参数¹⁾

Table 1 Experiment design and operational parameters												
试验阶段	厌氧	缺氧-1	好氧-1	缺氧-2	好氧-2	缺氧-3	好氧-3	Q1:Q2:Q3	流量/L·d ⁻¹	SRT/d	$\frac{Q_r}{\text{总流量}}$	$\frac{Q_c}{\text{总流量}}$
阶段Ⅰ(0~30 d)	—	2/32	5/80	2/32	4/64	2/32	5/80	0.33:0.33:0.33	320/320/320	15	0.6	-
阶段Ⅱ(31~60 d)	2/32	2/32	4/64	2/32	4/64	2/32	4/64	0.33:0.33:0.33	320/320/320	10	0.6	0.3
阶段Ⅲ(61~90 d)	2/32	2/32	4/64	2/32	4/64	2/32	4/64	0.45:0.35:0.20	432/336/192	10	0.6	0.3

1)表中数据为:格室数(个)/体积(L)

试验用水为北京某住宅小区生活污水(原水):COD 228.5~307.6 mg/L, TN 59.9~88.7 mg/L, NH_4^+-N 58.42~85.7 mg/L, BOD_5 110.7~150.5 mg/L, NO_3^--N 0.07~1.48 mg/L, 总磷(TP) 5.14~7.3 mg/L.整个试验阶段 COD/TN 比 3.06~4.41, COD/TP 比 35.7~55.1.

接种污泥取自北京市酒仙桥污水处理厂的回流污泥,污泥已具有较好的脱氮除磷性能.为进一步强化对聚磷菌的富集,在污泥接种到分段进水中试处理系统之前,在厌氧/好氧(3 h/4 h)SBR 中连续培养 30 d.

1.2.3 污泥静态分析试验

为考察系统对聚磷菌(PAOs)和反硝化聚磷菌(DNPAOs)的选择与富集情况,对污泥进行静态分析试验.在试验进行的第 0、20、50、80 d,从中试试验系统的二沉池取出部分污泥,投加到平行运行的 2 个有效容积为 10 L 的 SBR 反应器进行静态试验.反应开始迅速投加乙酸钠和磷酸二氢钾及微量元素,控制初始 COD 浓度(200 ± 10) mg/L,磷酸盐浓度 6 mg/L.先进行 180 min 厌氧搅拌,考察污泥的厌氧释磷性能.然后将污泥平均分为 2 份,投加到有效容积为 5 L 的 SBR 反应器,一份通入氧气进行好氧反应,一份投加硝酸钾并控制初始硝酸盐氮浓度为 25 mg/L 进行缺氧反应.2 种反应的持续时间均为 300 min.整个试验阶段每 30 min 取样 1 次.采用 WTW340i 测定仪在线监测 DO 和 pH,为避免发生化学沉淀,通过投加 HCl 和 NaOH 控制 pH 为 7.0~7.15. WTW730i 监测 ORP.采用温控装置控制反应温度 22℃.

1.3 分析方法

COD、 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 、MLSS 等测定均采用国家标准方法^[11],TKN 采用德国 Behr 总凯

氏氮测定仪,DO、pH 和温度均采用 WTW340i 在线测定仪测定,ORP 采用德国 WTW730i 在线测定仪测定.

2 结果与讨论

2.1 不同阶段系统对磷的去除特性

系统对 TP 的去除效率见图 2.可以看出,在系统运行初期(0~10 d),系统具有一定的除磷功能,TP 去除率最高达到 47.75%,然而随运行天数增加,TP 去除率不断下降,第Ⅰ阶段结束后,TP 去除率已降到 20%以下.分析认为,系统初期较好的 TP 去除率和试验启动时接种的含 PAOs 污泥及缺氧第 1 格室相对较低的硝酸盐浓度有关,当硝酸盐浓度较低且系统内聚磷菌竞争优势较强的时候,即使在缺氧环境下,也会发生磷的释放.然而随着试验进行,由于系统无严格的厌氧/好氧环境用以 PAOs 的选择生长,使得 PAOs 在系统中所占的比例逐渐降低,从而导致系统除磷功能逐渐减弱.从磷酸盐在系统内的沿程变化曲线(图 3)可以看出,工况Ⅰ通常在 D1 格室有少量的磷释放,然而由于释磷过程合成的 PHA 数量较少,导致好氧吸磷动力较低,好氧区只有少量

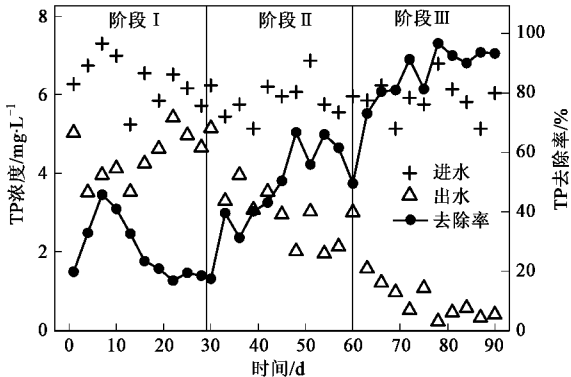


图 2 不同工况下系统对磷的去除效果

Fig.2 Phosphorus removal efficiency of system under different operational conditions

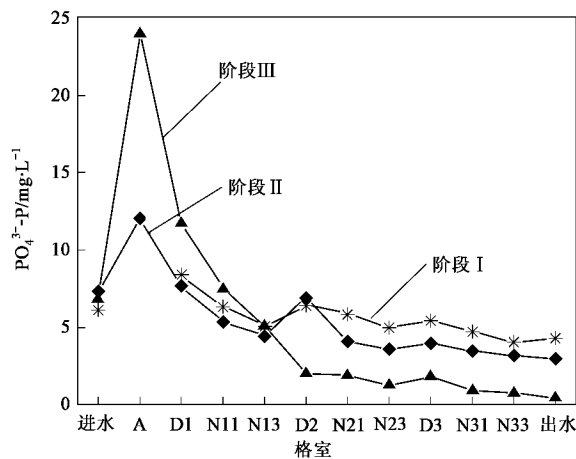


图 3 不同工况下磷酸盐浓度在系统中的变化
Fig.3 Phosphorus concentration at each stage under different operational conditions

的磷得以吸收,所以系统整体的除磷功能较差。

而进入第 II 阶段后,为增强系统的除磷功能,对工艺结构进行改进.改进后的 A²/O 分段进水工艺增设了厌氧区,且通过回流污泥及内循环的改变,尽可能降低硝酸盐氮对厌氧释磷的影响.从图 4 可以看出,第 II 阶段的 TP 去除率不断提高,平均 TP 去除率由阶段 I 的 29.74% 提高到 51.75%.从磷酸盐沿程变化曲线(图 3)可以看出,在第 II 阶段厌氧区磷酸盐的释放量达到 12.04 mg/L,且缺氧区 D1 和好氧区均有明显的磷酸盐吸收.且注意到,在缺氧区 II,磷又出现少量释放,这也说明在无溶解氧存在的条件下,厌氧放磷和硝酸盐的反硝化可同时发生.在随后的好氧格室,磷酸盐再次出现缓慢的吸收.在阶段 II, D1 出水硝酸盐氮通常在 4~5 mg/L,通常认为,有碳源存在的情况下,反硝化菌会优先利用碳源进行反硝化^[10-12,13],而本研究硝酸盐氮随内回流循环到厌氧区,其对碳源的竞争势必对厌氧释磷造成一定影响,因此阶段 III 将第 1 段进水比提高到 45%,以保证充分释磷。

阶段 III 的运行结果表明,由于第 1 段进水量的提高,用于厌氧释磷的易降解碳源量增加,厌氧区释磷量立刻出现较大幅度的提高,厌氧出水平均磷酸盐浓度达到 24.01 mg/L,比阶段 II 释磷量提高近 1 倍.由于厌氧区聚磷菌的充分放磷,体内合成的 PHA 量必然较多,因而用于后续吸磷的能量较为充足,出水磷酸盐浓度大部分时间低于 0.5 mg/L,平均 TP 去除率达到 89.81%.此外,从磷酸盐沿程变化(图 3)可以看出,在缺氧区 D1 出现磷酸盐的大量吸收,缺氧吸磷速率为 1.58 mg/(g·h),而好氧区的磷吸收速

率为 2.04 mg/(g·h),缺氧吸磷速率与好氧吸磷速率的比值为 77.45%.有研究认为,反硝化聚磷菌以硝酸盐为电子受体时每摩尔电子转移吸收的磷量较以氧为电子受体时低 20%~40%^[14],分析本研究较高的缺氧吸磷速率是由于聚磷菌经过厌氧释磷并吸收有机物合成 PHA 后,先进入缺氧区,最后才进入好氧区;在缺氧区中,一部分聚磷菌利用硝酸盐最为最终电子受体分解细胞内的 PHA,产生大量的能量用于磷的吸收和聚磷合成,与此同时聚磷菌得到增值;经过缺氧的碳能源消耗后,聚磷菌体内的 PHA 含量已大幅度下降,因此进入好氧区后,可用于产生能量的碳能源(有机物)供应水平明显降低,相应的磷吸收速率也降低了。

2.2 对氮的去除特性

系统运行的 3 个阶段,对氮的整体去除性能见图 4.可以看出,由于 3 个阶段系统曝气量始终控制在较高的水平,且系统好氧体积相对于系统负荷来说较为充足,因此,3 个阶段系统的氨氮去除率一直保持一个较高的水平,平均值为 98.25%、98.65% 和 98.0%.3 种工况下,系统氨氮、硝酸盐氮的沿程变化见图 5.可以看出,各工况下系统出水氨氮较低,均在 2 mg/L 以下,说明系统整体硝化容量充足.而在工况 III,由于第 1 段进水比由 33% 提高到 45%,第 1 段氨氮负荷超过第 1 段硝化容量,因此第 1 段出水氨氮达到 7.62 mg/L,但由于系统总体硝化容量充足,累积的氨氮在后面两段被相继去除,出水氨氮仍然低于 2 mg/L。

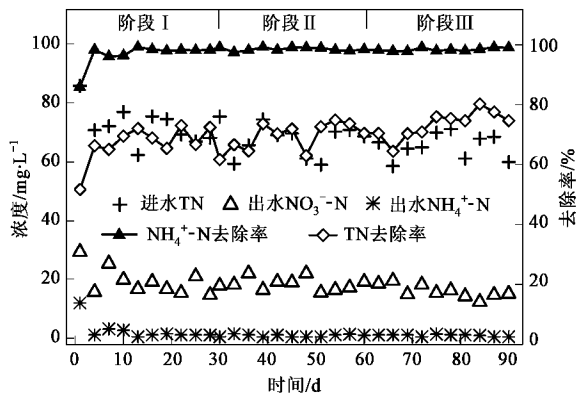


图 4 不同工况下系统对氮的去除效果
Fig.4 Nitrogen removal efficiency of system under different operational conditions

系统在 3 个阶段对 TN 的去除效率分别为 66.52%、72.18% 和 73.61%.虽然试验整个过程 TN 去除率无较大的波动,但从图 4 可以看出,从 75 d 之后,系统总氮去除率有明显的小幅上升,最高 TN

去除率达到 80.18% .而对于低 C/N(COD/TN 为 3.06 ~ 4.41)生活污水,由于厌氧释磷和缺氧反硝化对碳源的竞争,通常系统的最高氮、磷去除效率是一定的.TP 去除率的提高通常需要损失一定的 TN 去除率.而本研究在阶段 II 和 III,TP 去除效率提高的同时,TN 去除效率也得到一定提高.分析原因,由于系统反硝化聚磷菌的生长繁殖,使得厌氧区释放的磷酸盐在第 1 段缺氧区 D1 利用硝酸盐氮作为电子受体得到了充分的吸收,从而导致系统大量的硝酸盐

氮以反硝化除磷的途径去除.从氨氮、硝酸盐沿程变化曲线(图 5)也可以看出,在工况 III,缺氧区 D1 的硝酸盐氮浓度仅为 0.4 mg/L,这不仅使得随内循环回流到厌氧区的硝酸盐氮大大降低,强化聚磷菌的厌氧释磷效率,由于缺氧区一碳两用,大大节省了反硝化对碳源的消耗,累积到第 2、3 段的硝酸盐氮明显降低,使得 TN 去除效率得到了一定的提高. 试验运行各阶段,氨氮、硝酸盐氮、TN、TP 在系统内变化情况 & 系统对这些营养物的去除情况详见表 2.

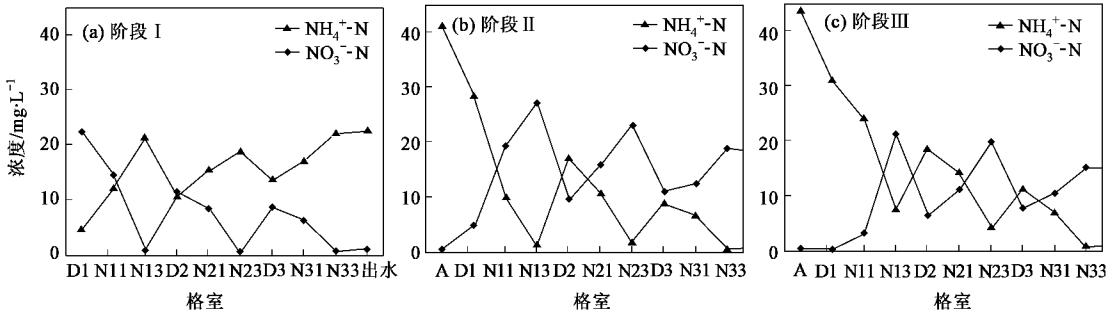


图 5 不同工况下氨氮、硝酸盐氮沿程变化

Fig.5 Ammonia and nitrate concentration in different stage under different operational conditions

表 2 不同工况下,系统对氨氮、硝酸盐氮、TN、TP 的去除情况

Table 2 Ammonia, nitrate, TN and TP removal under different operational conditions

格室	阶段 I				阶段 II				阶段 III			
	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TN	TP	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TN	TP	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TN	TP
进水	70.15	0.99	71.14	6.17	68.02	1.22	69.24	7.36	61	0.79	61.79	6.86
A(厌)	—	—	—	—	41.18	0.40	41.58	12.04	43.71	0.75	44.46	24.01
D1(缺)	22.44	4.77	25.20	8.34	28.37	4.74	33.11	7.69	31.11	0.40	31.51	11.74
N11(好)	14.64	12.28	26.92	6.41	10.07	19.32	29.38	5.38	24.10	3.34	27.44	7.5
N13(好)	0.915	21.37	22.28	5.05	1.22	27.09	28.31	4.45	7.62	21.41	29.04	5.14
D2(缺)	11.59	10.66	22.25	6.51	17.08	9.71	26.79	6.89	18.60	6.56	25.16	2.04
N21(好)	8.54	15.37	23.91	5.88	10.68	15.93	26.60	4.11	14.33	11.39	25.73	1.93
N23(好)	0.61	18.82	19.43	5.01	1.83	23.07	24.90	3.60	4.27	19.79	24.06	1.29
D3(缺)	8.85	13.62	22.46	5.50	8.85	11.05	19.89	4.01	11.28	7.87	19.16	1.86
N31(好)	6.41	17.24	23.65	4.78	6.71	12.52	19.23	3.49	7.02	10.66	17.67	0.92
N33(好)	0.92	22.21	23.13	4.04	0.61	18.84	19.45	3.18	0.92	15.32	16.24	0.98
出水	1.22	22.60	23.82	4.34	0.915	18.35	19.26	3.55	1.22	15.09	16.31	0.69
去除率/%	98.25	—	66.52	29.74	98.65	—	72.18	51.75	98.00	—	73.61	89.81

2.3 污泥特性分析

试验的 3 个阶段,系统表现出了不同的放磷吸磷特性,不仅发生好氧吸磷,也出现缺氧吸磷现象.为验证 PAOs 和 DNPAOs 在系统的增殖情况,对污泥进行静态分析试验.试验方法参照 Wachtmeister 等^[13]和 Meinhold 等^[15]设计的批量试验.他们认为缺氧吸磷和好氧吸磷速率及其比值反映了系统聚磷菌及反硝化聚磷菌的增值情况,并反映了反硝化聚磷菌占全部聚磷菌的比值^[16].试验分别在第 0、20、50 和 80 d 取样进行静态试验,结果见图 6.

图 6(a)是系统运行第 0 d,也就是污泥刚刚接种时的静态试验结果.可以看出,系统具有很好的厌氧放磷和好氧吸磷性能.在厌氧反应进行到 120 min 时,放磷量已接近最大值,180 min 结束后,厌氧区磷酸盐浓度已达到 28.3 mg/L.在好氧环境下,系统表现出较好的吸磷性能,在反应进行到 480 min 时,系统磷酸盐浓度为 0.2 mg/L,最大比好氧吸磷速率 [P/(MLSS·t)]为 8.67 mg/(g·h).而缺氧运行结果表明,系统发生了一定的缺氧磷吸收,但在 480 min 反应结束时,系统磷酸盐浓度为 20.2 mg/L,通过反硝

化吸收后磷酸盐浓度降低 8.1 mg/L, 最大比反硝化吸磷速率为 1.06 mg/(g·h), 缺氧最大比吸磷速率与好氧最大比吸磷速率的比值为 12.28% .

图 6(b)是阶段 I 运行 20d 污泥静态试验结果. 结果表明, 经过 20 d 的运行, 污泥厌氧释磷量大幅度下降, 第 180 min 结束时厌氧区磷酸盐浓度仅为 13.9 mg/L, 在好氧阶段, 由于厌氧释磷量较小, 聚磷菌合成的 PHB 量较小, 因此用于好氧吸磷的能量有限, 因此吸磷速率较低, 在 480 min 结束时, 剩余磷酸盐浓度为 1.1 mg/L, 好氧最大比吸磷速率为 2.34 mg/(g·h). 而缺氧吸磷速率更低, 仅为 0.33 mg/(g·h), 缺氧结束时磷酸盐浓度为 10.1 mg/L, 通过反硝化吸磷磷酸盐浓度仅降低 2.8 mg/L. 分析较低的吸磷速率原因, 在分段进水 A/O 系统中, 由于缺氧/好氧交替布置, 无严格的厌氧环境, PAOs 和 DNPAOs 细胞内存储的聚磷量逐渐减少, 这样的污泥即使提供严格的厌氧环境, 也无法保证有效释磷. 因此, 在批量试验中, 释磷效果大为降低, 进而影响好氧吸磷速率. 如果系统长期缺氧/好氧运行, PAOs 和 DNPAOs 将不断受到选择性抑制, 进而被淘汰出系统, 使系统完全丧失除磷功能.

图 6(c)是工况 II 运行第 50d 污泥静态试验结果. 可以看出, 和工况 I 相比, 系统厌氧释磷量有大幅度上升, 180 min 结束时, 厌氧区磷酸盐浓度达到 24.1 mg/L, 而好氧好氧吸磷速率亦有较大幅度的提高, 反应进行到 390 min 时, 磷酸盐浓度已降到 0.5 mg/L, 480 min 时, 磷酸盐浓度降到 0.09 mg/L, 最大比好氧吸磷速率为 6.02 mg/(g·h). 而缺氧条件下, 系统亦发生了较为明显的缺氧磷吸收现象, 480 min 结束时, 磷酸盐浓度由 24.1 mg/L降低到 14.1 mg/L, 最大比缺氧磷吸收速率为 1.27 mg/(g·h), 缺氧磷吸收速率与好氧磷吸收速率的比值为 21.1%. 可以看出, 经过对工艺改进, 强化除磷条件, 系统释磷、吸磷效率在短时间内均得到较大提高, PAOs 和 DNPAOs 均得到了选择性增长.

图 6(d)是改变第 1 段进水流量之后系统污泥性能. 经过第 II 阶段的选择富集, 以及第 III 阶段对厌氧释磷的强化, 污泥的放磷和吸磷速率进一步提高. 厌氧区在第 90 min 时, 释磷量已接近最大值, 180 min 结束时, 磷酸盐浓度达到 27.7 mg/L, 由于厌氧区充分释磷, 合成较多的 PHA, 因而用于好氧或缺氧吸磷的动力较为充足, 使得好氧和缺氧吸磷速率较第

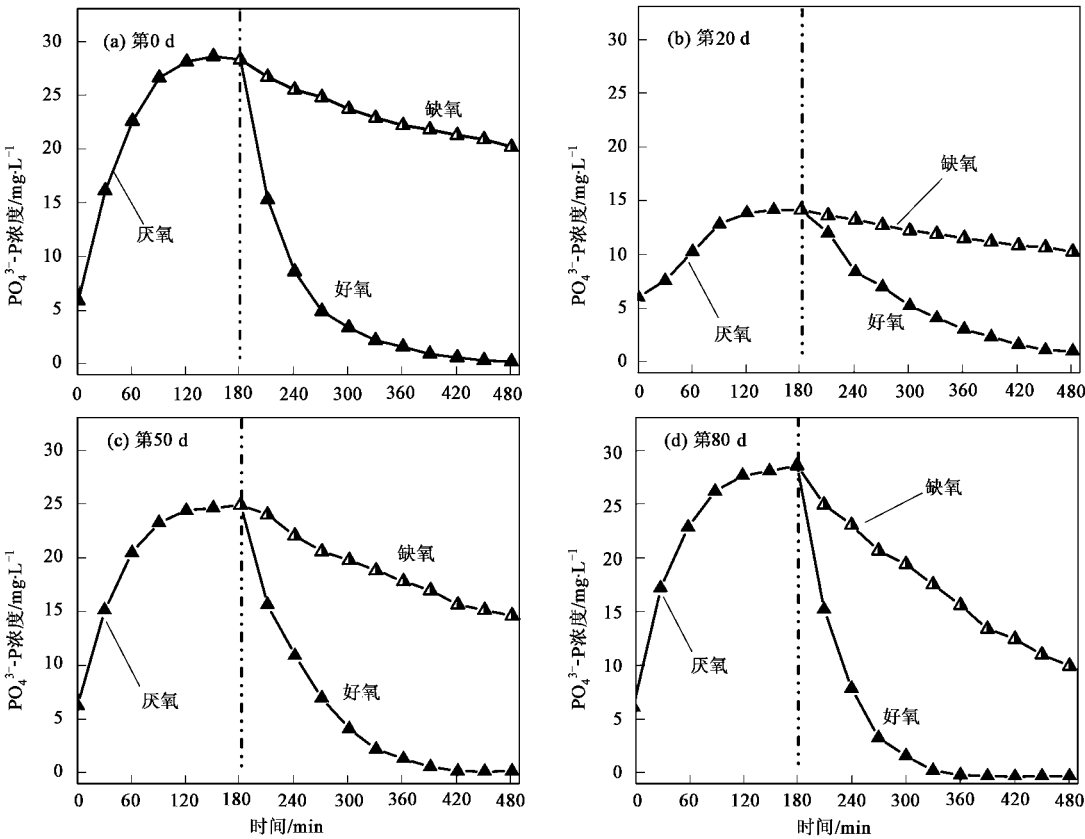


图 6 不同阶段的活性污泥放磷、吸磷静态试验

Fig.6 Phosphorus release and uptake test with the activated sludge obtained from different operation phases

50d 的试验结果有较大提高,好氧反应进行到第 360 min 时,磷酸盐浓度降低到 0.2 mg/L,420 min 时已降低到 0.05 mg/L,最大比好氧吸磷速率达到 10.67 mg/(g·h).而最大比缺氧吸磷速率也由第 50d 的 1.27 mg/(g·h),提高到 2.81 mg/(g·h),最大比缺氧吸磷速率与最大比好氧吸磷速率的比值达到 26.36%.此结果证实了系统在经过改进和优化后,聚磷菌和反硝化聚磷菌均得到增殖,除磷功能得到强化.

3 结论

(1) 对分段进水 A/O 工艺进行改进,通过增加厌氧区,并增设内循环设施,可实现稳定的生物除磷功能.改进前系统平均 TP 去除率为 29.74%,TN 去除率为 66.52%.改进后并将进水流量分配比调整为 0.45:0.35:0.20,系统平均 TP 去除率为 89.81%,TN 去除率为 73.61%,分别比工艺改进前提高 60.07%和 7.09%.改进工艺出水 TP 稳定地低于 1 mg/L,因此该改进型的 BNR 工艺可作为要求同步脱氮除磷的污水处理厂的一种工艺选择.

(2) 稳定运行的改进型分段进水 A/O 同步脱氮除磷系统,可实现对聚磷菌和反硝化聚磷菌的同步选择富集,缺氧吸磷效率的提高,使得部分硝酸盐氮在缺氧区作为反硝化除磷的电子受体而去除,实现一碳两用.改进后的系统处理低 C/N 生活污水,除磷的实现不仅不会对脱氮造成不利影响,反而由于反硝化除磷的强化,一定程度上可以提高 TN 去除效率.

(3) 污泥静态试验表明,通过强化厌氧释磷,改进工艺可以不断富集聚磷菌和反硝化聚磷菌,因此可以保证系统长期稳定运行.

参考文献:

- [1] Göğün E, Artan N, Orhon D, *et al.* Evaluation of nitrogen removal by step feeding in large treatment plants[J]. Wat Sci Technol, 1996, **34**(1-2): 253-260.
- [2] Larrea L, Larrea A, Ayesa E, *et al.* Development and verification of design and operation criteria for the step feed process with nitrogen removal[J]. Wat Sci Technol, 2001, **43**(1): 261-268.
- [3] deBallillo C, Carrio L, Mahoney K, *et al.* Practical considerations for design of a step-feed biological nutrient removal system[J]. Florida Water Resources Journal, 2002, (1): 18-20.
- [4] George T, Franklin L B, Stensel H D. Wastewater engineering treatment and reuse[M]. New York: Metcalf & Eddy, Inc., 2003.
- [5] Olsson G, Nielsen M K, Yuan Z, *et al.* Instrumentation, Control and Automation in Wastewater Systems [M]. London: IWA publishing, 2005.
- [6] Bortone G, Saltarelli R, Alonso V, *et al.* Biological anoxic phosphorus removal-the Dephanox process[J]. Wat Sci Technol, 1996, **34**(1-2): 119-128.
- [7] Wanner J, Cech J S, Kos M. New process design for biological nutrient removal[J]. Wat Sci Technol, 1992, **25**(4-5): 445-448.
- [8] Chuang S H, Ouyang C F. The biomass fractions of heterotrophs and phosphate-accumulating organisms in a nitrogen and phosphorus removal system[J]. Wat Res, 2000, **34**(8): 2283-2290.
- [9] Kuba T, van Loosdrecht M C, 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.
- [10] Kuba T, van Loosdrecht M C, Brandse F A, *et al.* Occurrence of denitrifying phosphorus removing bacteria in modified UCT-type wastewater treatment plants[J]. Wat Res, 1997, **31**(4): 777-786.
- [11] 王心芳,尹改,魏复盛. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [12] Van Starckenburg W, Rensink J H, Rijs G B J. Biological P-removal: state of the are in the Netherlands[J]. Wat Sci Technol, 1993, **27**(4): 317-328.
- [13] Wachtmeister A, Kuba T, van Loosdrecht M C M, *et al.* A sludge characterization assay for aerobic and denitrifying phosphorus removing sludge[J]. Wat Res, 1997, **31**(3): 471-478.
- [14] Barker P S, Dold P L. Denitrification behavior in biological excess phosphorus removal activated sludge systems[J]. Wat Res, 1996, **30**(4): 769-780.
- [15] Meinhold J, Filipe C D M, Dagger G T, *et al.* Characterization of the denitrifying fraction of phosphate accumulating organisms in biological phosphate removal process[J]. Wat Sci Technol, 1999, **39**(1): 31-42.
- [16] 王晓莲. A²/O 工艺运行优化及其过程控制的基础研究[D]. 北京:北京工业大学, 2007. 41-52.