

A^2O -BAF 联合工艺处理低碳氮比生活污水

彭永臻, 王建华, 陈永志

(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: 研究了 A^2O -BAF 联合工艺处理低碳氮比生活污水时, A^2O 工艺段厌氧区、缺氧区和好氧区的最佳容积比及硝化液回流比, 探讨了强化该工艺的反硝化除磷工艺条件。结果表明, 在 A^2O 水力停留时间为 5.6 h、污泥龄为 9 d、污泥回流比 100%、硝化液回流比 200%、BAF HRT 为 30 min、出水溶解氧质量浓度为 6~8 mg/L 的工况下处理碳氮比为 3.21 的生活污水, 系统存在反硝化除磷现象。调节 A^2O 工艺段各区容积比, 当比值为 3:4:2 时, 系统的脱氮除磷效率最佳, 总氮和总磷的去除率分别是 67.4% 和 98.6%。结果表明, 维持该容积比不变, 改变硝化液回流比, 硝化液回流比为 250% 时系统反硝化除磷效果最好, 其中绝大多数的聚磷菌具有反硝化除磷的能力, 缺氧区出水硝态氮和总磷的质量浓度几乎为 0。该双污泥工艺能充分发挥活性污泥工艺与生物膜工艺的优势, 尤其对于处理低碳氮比生活污水能达到良好的处理效果。

关键词: 碳氮比; 容积比; 硝化液回流比

中图分类号: X 703.1

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2012)04-0590-06

Treating Low Carbon and Nitrogen Ratio Sewage With an A^2O -BAF System

PENG Yong-zhen, WANG Jian-hua, CHEN Yong-zhi

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

Abstract: Using a A^2O -BAF system to treat sewage with a low carbon and nitrogen ratio, the best volume ratio of anaerobic zone, anoxic zone, and aerobic zone of A^2O and nitrite return ratio are investigated, and how to strengthen denitrifying dephosphatation is also researched. Results show that under the conditions of hydraulic retention time (HRT) 5.6 h, sludge retention time (SRT) 9 d, sludge return ratio 100%, nitrate recycle ratio 200% of A^2O , HRT 30 min, and effluent $\rho(\text{DO})$ 6~8 mg/L of BAF, there exists dephosphatation in the system. When the volume ratio of anaerobic/anoxic/aerobic zone is 3:4:2, which not only satisfies the development of PAOs, but also suppresses reproduction of nitrifying bacteria, 67.4% of TN and 98.6% of TP are removed. With the same volume ratio, when the nitrate return ratio is 250%, the dephosphatation efficiency is the best. Most of PAOs have the denitrifying dephosphatation ability, and the effluent nitrate nitrogen and TP are nearly 0. The two-sludge system can fully exert advantages of the activated sludge process and biological membrane technology. It is a suitable system for treating low carbon nitrogen ratio sewage and can achieve advanced phosphorus and nitrogen removal.

Key words: carbon and nitrogen ratio; volume ratio; nitrate return ratio

收稿日期: 2010-01-07.

基金项目: 国家“十一五”重大科技专项课题(2008ZX07317-007-005).

作者简介: 彭永臻(1949—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水污染控制工程方面的研究, E-mail: pyz@bjut.edu.cn.

A²O 工艺具有同时去除有机物、氮和磷,且总水力停留时间(hydraulic retention time, HRT)短、易操作控制、处理水量大、运行费用较低等优点,是中国污水处理最简单的同时脱氮并除磷的工艺之一。但该工艺也存在着缺点,在同一反应系统中同时存在聚磷菌和硝化细菌,由于聚磷菌和硝化细菌对污泥龄要求不一样,这将引起2种细菌对污泥龄要求的矛盾^[1-3]。针对 A²O 工艺存在的缺陷,提出了 A²O-BAF 联合工艺,该联合工艺中 A²O 系统主要完成的是有机物的去除、除磷、反硝化,而将曝气生物滤池(biological aerobic filter, BAF)置于二沉池之后,主要目的是完成硝化,BAF 的部分出水回流到 A²O 系统的缺氧段为反硝化作用和缺氧吸磷作用提供相应的电子受体。该双污泥工艺解决了传统 A²O 工艺硝化菌与聚磷菌泥龄矛盾,且最大程度地发挥了活性污泥与生物膜这2种处理技术的优势。因硝化作用在 BAF 中进行,使得回流污泥中不含或含有少量的硝态氮,从而进一步解决了在厌氧区反硝化菌与聚磷菌对碳源的争夺^[4-7]。

反硝化除磷菌可在缺氧的环境下,利用硝态氮或亚硝态氮为电子受体氧化体内贮存的 PHA,从环境中摄磷达到脱氮和除磷的双重目的。该 A²O-BAF 工艺在处理低碳氮比生活污水时存在反硝化除磷现象,而反硝化除磷可节省约 50% 化学需氧量

(chemical oxygen demand, COD) 和 30% 氧的消耗量,相应减少剩余污泥量 50%^[8-9],缓解了反硝化菌与聚磷菌对碳源的争夺,弥补了碳源缺乏的不足。

本试验在 A²O 工艺和 BAF 工艺基础上,重点研究了2种工艺联合后 A²O 中厌氧段、缺氧段和好氧段的最佳容积比,同时考察了处理低碳氮比生活污水时硝化液回流比对反硝化除磷特性的影响,从而为实现已建污水处理厂的改造、优化与升级,以及污水的深度脱氮除磷提供了有效的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验装置和运行参数

A²O-BAF 联合工艺系统包括6个部分,分别为进水箱、A²O 反应池、二沉池、中间水箱、BAF 反应池和出水水箱,如图1所示。其中, A²O 系统由9个格室构成,总有效容积是30 L。A²O 的进水量为129.6 L/d,相应的 HRT 为5.6 h,混合液污泥(mixed liquid suspended, MLSS)质量浓度为2 500 mg/L左右,污泥龄(sludge retention time, SRT)为9 d,硝化液回流200%,污泥回流100%,其中,污泥取自北京市某污水处理厂的 A²O 中试系统,二沉池有效容积21 L, BAF 空塔容积15 L,实际 HRT 为30 min。硝酸盐回流量、污泥回流量、进水量和旁流流量均由蠕动泵控制,BAF 填料为陶粒。

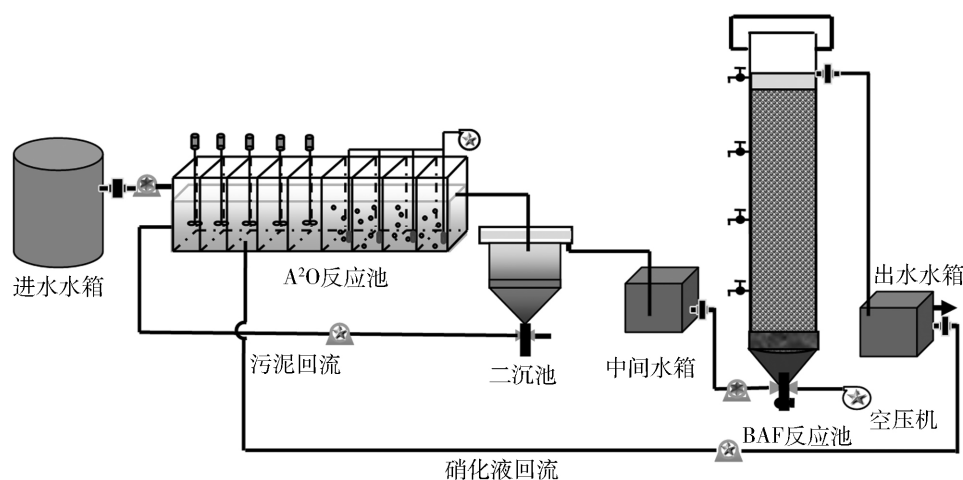


图1 A²O-BAF 联合工艺流程

Fig. 1 Schematic diagram of the A²O-BAF system

1.2 试验用水和测试方法

试验用水取自某学校生活区所排放的生活污水,水质情况如表1所示。进水的 $\rho(\text{C})/\rho(\text{N})$ 仅为3.21,属于典型的低碳氮比生活污水。

COD 采用 COD 快速测定仪测定; NH_4^+-N 采用

纳氏试剂光度法测定; NO_2^--N 采用 N-(1-萘基)-乙二胺光度法测定; NO_3^--N 采用麝香草酚分光光度法测定; $\rho(\text{MLSS})$ 采用滤纸称重法测量; T 、pH 和溶解氧(dissolved oxygen, DO) 采用 WTW inolab level 2 在线监测仪测量。

表 1 试验用水水质

Table 1 Characteristics of influent wastewater

参数	$\rho(\text{COD}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TN}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{C}) / \rho(\text{N})$	$\rho(\text{C}) / \rho(\text{P})$
范围	138.2 ~ 244	53.6 ~ 69.7	3.34 ~ 9.57		
平均值	207.8	64.8	5.4	3.21	38.5

A^2O -BAF 联合工艺稳定运行后,对 A^2O 系统中的反硝化除磷菌(DPAOs) 占总聚磷菌(PAOs) 的比例进行实验估计. 在 A^2O 系统的好氧区末端取 2 L 混合液,用蒸馏水清洗 2 遍,加入到容积为 2 L 的 SBR 模拟反应器中,碳源为乙酸钠,其浓度约为 200 mg/L. 厌氧 2 h,反应结束后,污泥再次用蒸馏水清洗 2 遍并平均分成 2 份,1 份在 $\rho(\text{DO}) = 2 \text{ mg/L}$ 的情况下好氧运行 2 h,另 1 份加入 50 mg/L 的硝态氮缺氧条件下反应 2 h. 缺氧最大吸磷速率和好氧最大吸磷速率的比值可间接地确定系统中 DPAOs 占 PAOs 的比例^[10-11].

1.3 试验方案

阶段 1: A^2O 中厌氧、缺氧和好氧区容积比的确定.

工况 I: $V_{\text{厌氧}}:V_{\text{缺氧}}:V_{\text{好氧}} = 1:2:6$

工况 II: $V_{\text{厌氧}}:V_{\text{缺氧}}:V_{\text{好氧}} = 2:3:4$

工况 III: $V_{\text{厌氧}}:V_{\text{缺氧}}:V_{\text{好氧}} = 3:4:2$

阶段 2: 在最适宜容积比条件下,确定最佳硝化液回流比分别为 100%、200%、250%、300%.

2 试验结果分析

2.1 A^2O 厌氧、缺氧、好氧容积比的确定

图 2~4 反映了 A^2O 系统分别为工况 I、II、III 时的 1 个周期各区 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 TP 质量浓度的变化情况.

COD: A^2O 厌氧区、缺氧区、好氧区容积比的变化对 COD 去除率的影响效果不明显;3 种容积比条件下 80% 的有机物都在厌氧段被聚磷菌所消耗,合成其体内的 PHA,在缺氧区和好氧区 COD 只去除了 10% 左右;3 种工况 COD 的去除率都高达 80% 以上.

$\text{NH}_4^+\text{-N}$: 为了达到抑制系统中硝化细菌繁殖的目的,一方面减少 A^2O 系统中好氧区的容积,另一方面减少 A^2O 系统相应的污泥龄. 由于污泥从二沉池回流到厌氧段及 BAF 系统的大部分硝化液回流到缺氧段,这样使得进水的 $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 降低,因此在厌氧区和缺氧区 $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 的减少主要依靠的是稀释作用. 随着 A^2O 系统好氧区容积的缩短, A^2O 系统硝化细菌的比例逐渐降低直至淘洗干净. 图 2~4

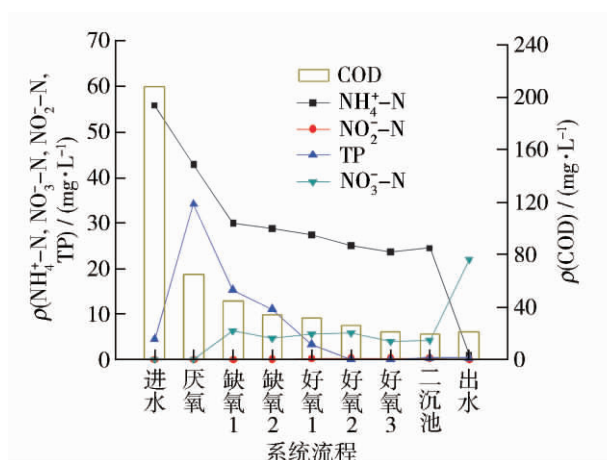
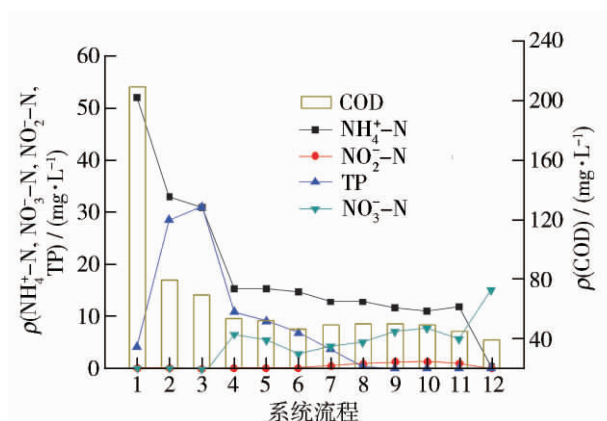


图 2 典型周期各项指标的变化情况
(容积比为 1:2:6)

Fig. 2 Change ratio of each index during a cycle with a volume ratio of 1:2:6



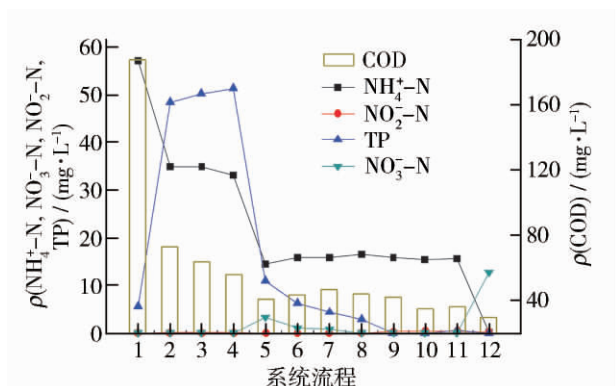
1—进水; 2—厌氧 1; 3—厌氧 2; 4—缺氧 1; 5—缺氧 2; 6—缺氧 3; 7—好氧 1; 8—好氧 2; 9—好氧 3; 10—好氧 4; 11—中间水箱; 12—出水

图 3 典型周期各项指标的变化情况
(容积比为 2:3:4)

Fig. 3 Change ratio of each index during a cycle with a volume ratio of 2:3:4

所示 3 种容积比条件下 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的转化主要在 BAF 中进行. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率几乎达到 100%, 可保证出水 $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 为零.

TP: 3 种容积比条件下 $\rho(\text{TP})$ 在缺氧区均有不同程度的降低, 这表明在 $\rho(\text{C}) / \rho(\text{N}) = 3.21$ 的低



1—进水; 2—厌氧 1; 3—厌氧 2; 4—缺氧 1; 5—缺氧 2; 6—缺氧 3; 7—好氧 1; 8—好氧 2; 9—好氧 3; 10—好氧 4; 11—中间水箱; 12—出水

图4 典型周期各项指标的变化情况
(容积比为 3:4:2)

Fig. 4 Change ratio of each index during a cycle with a volume ratio of 3:4:2

碳氮比生活污水的长期驯化下,提供反硝化除磷菌良好的环境,使得其数量不断增加。其中,工况Ⅲ厌氧区聚磷菌释磷量达到了 51.3 mg/L,同时缺氧区反硝化聚磷菌的吸磷量也达到了 45.9 mg/L,好氧区聚磷菌吸磷量仅为 4.45 mg/L,由此可见 TP 的吸收/TP 的释放达到 1.204。从而可得出,厌氧区水力停留时间越大 PAOs 释磷量越充分;相应缺氧区容积越大, DPAOs 繁殖越快。

$\text{NO}_3^- - \text{N}$: 由于该联合工艺的一大特点是硝化作用发生在 BAF 中而不是 A²O 反应器中,因此工艺出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 主要由 2 部分组成,即 A²O 反应器缺氧区出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 BAF 中由 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 转化的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$, 因此想要减少出水 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 就可从这 2 方面入手。若 A²O 反应器中各参数已经确定,进入 BAF 中 $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 就确定了,因此应减少 A²O 反应器出水 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 。在反硝化除磷系统中,当缺氧区 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N}) = 0$ 时,将会引起缺氧区的厌氧状态,从而导致磷的二次释放,但如果系统中存在 COD,反硝化菌就会优于聚磷菌利用 COD 进行反硝化作用,这样 DPAOs 就无法成为优势细菌^[12],所以要想提高 DPAOs 所占的比例就要调整缺氧区进水 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 和 $\rho(\text{COD})$ 。

在工况Ⅰ条件下由于缺氧区的容积较短,反硝化除磷现象不明显, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 在缺氧区减少的量较小;在工况Ⅱ条件下随着缺氧区容积的增加,强化了聚磷菌反硝化除磷作用,但缺氧区出水仍含有较多的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$;在工况Ⅲ条件下由于进入缺氧区可降解

的 COD 较少,此条件下反硝化除磷效果最好,缺氧出水 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 和 $\rho(\text{TP})$ 几乎为零。

$\text{NO}_2^- - \text{N}$: $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 变化不明显。由此可见,工况Ⅲ的容积比是最佳 A²O-BAF 联合工艺中 A²O 的容积比。

图 5 给出了 A²O 中各区容积比分别是工况Ⅰ~Ⅲ时缺氧区出水和最终出水 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 以及 TN 去除率的变化。从图中可看出工况Ⅰ时,缺氧区出水和最终出水的 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 都是最高的。3 种工况下平均最终出水 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 分别为 19.05、16.15 和 11.94 mg/L,说明 A²O 系统各区的比例越大,出水 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 越低,主要是由于厌氧区容积越大,聚磷菌的释磷作用越充分,缺氧区容积越大,反硝化除磷作用越明显,工况Ⅲ条件下缺氧区出水 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 几乎为 0,对比上图 TP 的去除主要发生在缺氧区。3 种工况下,出水 $\rho(\text{TN})$ 的变化量几乎与缺氧区出水 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 的变化量相同。随着好氧区容积的减少、厌氧区与缺氧区的增加, TN 的去除率也相应增加。

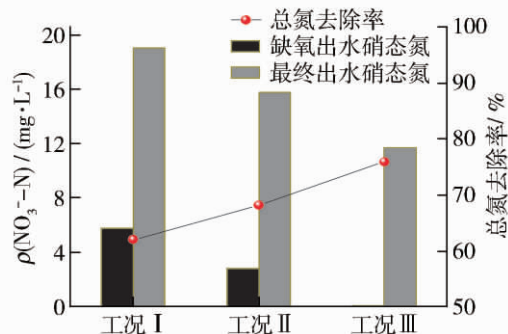


图5 不同的各区容积比下硝态氮的变化与总氮的去除率

Fig. 5 Change of nitrate and the removal rate of total nitrogen under the condition of different volume ratio

2.2 硝化液回流比对系统脱氮除磷效果的影响

硝化液回流比增大对反硝化除磷有利,因为提高回流比能为反硝化除磷菌提供足够多电子受体,当其量超过反硝化菌所能承受的范围时,就能刺激反硝化除磷菌的繁殖。图 6 是维持厌氧区、缺氧区与好氧区的容积比为 3:4:2,其他的条件不变,改变硝化液回流比为 100%、200%、250% 和 300% 时总氮与总磷去除率变化情况。从图中可看出随着硝化液回流比的增加,总氮和总磷的去除率变化趋势都是先增大后减小,以 250% 为转折点,硝化液回流比为 250% 时,总氮和总磷的去除率最高,分别为 74.4% 和 98.2%,此时缺氧吸磷率最高。当硝化液

回流比小于 250% 时,总氮和总磷的去除率升高,这是由于提高了缺氧区的 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$,反硝化除磷效率提高,从而脱氮除磷效果也提高.但当硝化液回流比为 300% 时,总氮和总磷的去除率反而下降,这可能是由于回流比的增大,缺氧区的水力停留时间减少,反硝化除磷效果降低.

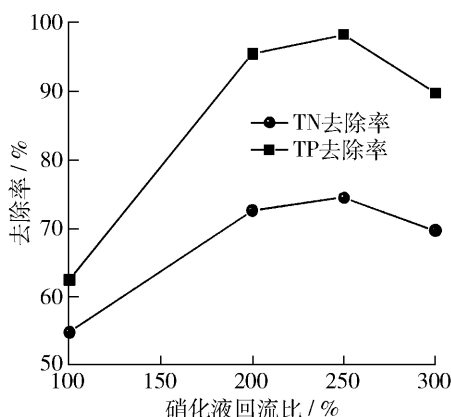


图 6 不同硝化液回流比总氮和总磷去除率的变化

Fig. 6 Removal ratio change of TN and TP at different nitrate recycle ratios

不同硝化液回流比条件下缺氧区出水 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 与缺氧吸磷率的变化情况如图 7 所示,可以看出,当硝化液回流比为 250% 时,缺氧吸磷率最大为 87.3%,其缺氧出水 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 和 $\rho(\text{TP})$ 分别为 0.78 和 0.67 mg/L,即缺氧出水的 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 和 $\rho(\text{TP})$ 都小于 1 mg/L,此条件下既没有因为缺氧出水 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N}) = 0$ 而使得缺氧区的厌氧状态引起“二次释磷”,同时还能保证最佳的吸磷率.由此可表明 A^2O -BAF 联合工艺在处理 $\rho(\text{C})/\rho(\text{N}) = 3.21$ 的生活污水时, A^2O 中各区容积比为 3:4:2,硝化液回流比为 250% 的条件下时,出水效果最好.

2.3 A^2O 污泥特性试验

聚磷菌分为 2 类,好氧聚磷菌和反硝化聚磷菌,好氧聚磷菌利用氧或者硝态氮为电子受体,反硝化聚磷菌以硝态氮或亚硝态氮为电子受体^[13-14].从图 8 可看出,经过低 $\rho(\text{C})/\rho(\text{N})$ 比生活污水几个污泥龄的驯化,反硝化除磷菌占聚磷菌的比例加大,好氧条件下每 g 挥发性悬浮固体微生物 1 h 吸磷 19.78 mg,缺氧条件下每 g 挥发性悬浮固体微生物 1 h 释磷 15.24 mg,即缺氧和好氧最大吸磷率比为 0.771,该工艺为反硝化除磷菌提供良好的繁殖环境,使得绝大多数的聚磷菌具有反硝化除磷的能力.以上结果说明 A^2O -BAF 联合工艺在低碳氮比启动的过程中磷主要是靠反硝化除磷去除,这就节省了

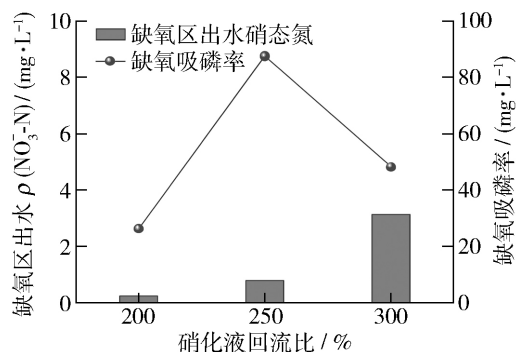


图 7 不同硝化液回流比缺氧区出水硝态氮与缺氧吸磷率的变化

Fig. 7 Change of the anoxic nitrate effluent and anoxic uptake ratio at different nitrate recycle ratios

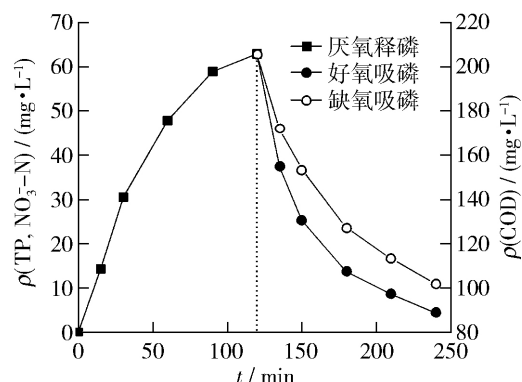


图 8 厌氧释磷和好氧、缺氧吸磷试验

Fig. 8 Phosphorus release and uptake under anaerobic-anoxic and anaerobic-aerobic conditions

好氧区容积,从而削弱了 A^2O 反应段的硝化作用.

3 结论

1) A^2O -BAF 联合工艺处理 $\rho(\text{C})/\rho(\text{N})$ 为 3.21 的生活污水, A^2O 工艺段各区容积比为 3:4:2 时,系统的脱氮除磷效率最佳,总氮和总磷的去除率分别是 67.4% 和 98.6%.

2) 保持 A^2O 工艺段中各区容积比为 3:4:2 不变,调节硝化液回流比其值为 250% 时系统的脱氮除磷最佳,绝大多数的聚磷菌具有反硝化除磷的能力,并保证缺氧区出水 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 和 $\rho(\text{TP})$ 几乎为 0,实现了碳源的最佳分配和利用.

3) 提高厌氧区的容积,聚磷菌的释磷量增加;提高缺氧区的容积,反硝化除磷比例增大.通过减少好氧段的容积可实现以上 2 方面,该工艺用于处理碳氮比低的生活污水,可最大效率地发挥系统的反硝化除磷作用.

参考文献:

- [1] KUBE T, VAN M C, HEIJINEN J J. Phosphorus and nitrogen removal with minimal COD requirement by integration of denitrifying dephosphatation and nitrification in a two sludge system [J]. *Water Research*, 1996, 30 (7): 1702-1710.
- [2] SU J L, OUYANG C F. Advanced biological enhanced nutrient removal processes by the addition of rotating biological contactors. *Water Science and Technology*, 1997, 35(8): 153-160.
- [3] DING Y W, WANG L, WANG B Z, et al. Removal of nitrogen and phosphorus in a combined A (2) /O-BAF system with a short aerobic SRT [J]. *Journal of Environmental Sciences-China*, 2006, 18 (6): 1082-1087.
- [4] BANU J R, UAN D K, CHUNG I J, et al. A study on the performance of a pilot scale A2/O-MBR system in treating domestic wastewater [J]. *Journal of Environmental Biology*, 2009, 30(6): 959-963.
- [5] CHUANG S H, OUYANG C F, YUANG H C, et al. Effects of SRT and DO on nutrient removal in a combined AS-biofilm process [J]. *Water Science and Technology*, 1997, 36(12): 19-27.
- [6] LEE J M, CHOI I S, WIESMANN U. Test of porous ceramic material for the immobilisation of predominantly nitrifying bacteria and for the improvement of the AAO process [J]. *Engineering in Life Sciences*, 2004, 4(1): 31-37.
- [7] YOU S J, CHUANG S H, OUYANG C F. Nitrification efficiency and nitrifying bacteria abundance in combined AS-RBC and A2O systems [J]. *Water Research*, 2003, 37(10): 2281-2290.
- [8] MURNLEITNER E, KUBA T, VAN M C, et al. An integrated metabolic model for the aerobic and denitrifying biological phosphorus removal [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1997, 54: 434 - 450.
- [9] MERZOUKI M, BERNET N, DELGENES J, et al. Biological denitrifying phosphorus removal in SBR: effect of added nitrate concentration and sludge retention time [J]. *Water Science and Technology*, 2001, 43(3): 191-194.
- [10] WACHTMEISTER A, KUBA T, VAN M. A sludge characterization assay for aerobic and denitrifying phosphorus removing sludge [J]. *Water Research*, 1997, 31(3): 471-478.
- [11] PENG Y Z, WANG X L, LI B. Anoxic biological phosphorus uptake and the effect of excessive aeration on biological phosphorus removal in the A (2) O process [J]. *Desalination*, 2006, 189(1/2/3): 155-164.
- [12] WANG X L, PENG Y Z, WANG S Y, et al. Influence of wastewater composition on nitrogen and phosphorus removal and process control in A (2) O process [J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2006, 28(6): 397-404.
- [13] LEE D, JEON C, PARK J. Biological nitrogen removal with enhanced phosphate uptake in a sequencing batch reactor using single sludge system [J]. *Water Research*, 2001, 35(16): 3968-3976.
- [14] KERRN J P, HENZE M. Biological phosphorus uptake under anoxic and aerobic condition [J]. *Water Research*, 1993, 27(4): 617-624.

(责任编辑 吕小红)