

碳氮比及 HRT_s 对交替缺氧/好氧 CAST 去除营养物的影响

王丽¹, 彭永臻^{1*}, 马娟¹, 刘洋², 马宁平²

(1. 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; 2. 标准水务有限公司, 北京 100022)

摘要:以实际生活污水为处理对象, 分别研究了碳氮比(COD/TN)为2.6、3.5及4.4时, HRT_s (选择器水力停留时间)对交替缺氧/好氧(A/O)CAST工艺去除营养物性能的影响. 结果表明, 采用交替A/O运行方式, 进水COD/TN比及 HRT_s 的变化对COD去除性能影响不明显; 而对脱氮性能影响较大. 当进水COD/TN比分别为2.6和3.5时, 系统氨氮去除率均维持在98%以上, TN去除率则随 HRT_s 的增大而升高; HRT_s 由1.8 h增至5 h时, 2种碳氮比下的TN去除率分别由62.9%、72.1%升至76.2%、84.6%. 当进水COD/TN比为4.4时, HRT_s 由1.8 h增至5 h导致系统硝化不完全, TN去除率由86.3%降至58.2%. 研究还发现, 提高COD/TN比和增大 HRT_s 均能改善系统的除磷性能. 本研究中交替A/O运行方式下, 进水COD/TN比为4.4(远低于一般城市生活污水的8~10), HRT_s 为1.8 h时, CAST工艺获得较好的脱氮除磷效果, TN及磷的去除率分别为86.3%和93.8%, 出水达到我国城镇污水处理厂污染物排放标准(GB 18918-2002)一级A要求.

关键词: COD/TN比; HRT_s ; 交替A/O; 脱氮除磷; CAST

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)10-2370-06

Effects of COD/TN and HRT_s on Nutrients Removal by an Alternating Anoxic/Oxic CAST

WANG Li¹, PENG Yong-zhen¹, MA Juan¹, LIU Yang², MA Ning-ping²

(1. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Standard Water Co. Ltd., Beijing 100022, China)

Abstract: The effects of different COD/TN and HRT_s (hydraulic retention time of select) on nutrients removal were investigated by using an alternating anoxic/oxic CAST (cyclic activated sludge technology) fed with municipal wastewater. The results showed that various COD/TN and HRT_s had a bigger influence on the nitrogen removal efficiency rather than the COD removal efficiency. As the influent C/N ratios were about 2.6 and 3.5, ammonia was removed by 98% and TN removal efficiency was increased from 62.9% to 76.2% and 72.1% to 84.6%, respectively, by increasing the HRT_s from 1.8 h to 5 h. When the COD/TN ratio was increased to about 4.4, TN removal efficiency was decreased from 86.3% to 58.2% by enlarging the HRT_s , which was due to the incomplete nitrification of ammonia. It was also observed that both of increasing the COD/TN and HRT_s could improve the phosphorus removal performance of the system. Furthermore, effluent of CAST reached the demanded A of integrated wastewater discharge standards (GB 18918-2002) when the COD/TN and HRT_s were 4.4 and 1.8 h, respectively.

Key words: COD/TN ratio; HRT_s ; alternating anoxic/oxic; biological nutrients removal; CAST

氮、磷等元素过量是引起封闭水体富营养化的主要原因, 因此污水生物脱氮除磷技术成为污水处理领域的热点和难点. 生物脱氮主要分为硝化和反硝化2个过程, 即氨氮在好氧条件下被氧化成硝酸盐氮, 而后硝酸盐氮在缺氧条件下被还原为氮气^[1, 2].

传统生物除磷也称为生物强化除磷(enhanced biological phosphorus removal, EBPR), 主要包括厌氧释磷和好氧摄磷2个过程^[3, 4]. 研究表明, 如果聚磷菌没有得到严格的厌氧环境, 如有硝酸盐存在, 那么EBPR就会减弱甚至消失^[5~8]. 换言之, 生物除磷只能在存在VFA类快速可利用小分子碳源的厌氧/

好氧交替环境下或者兼具生物脱氮的厌氧/缺氧/好氧环境下才可以发生, 而在缺氧/好氧交替的环境生物脱氮过程中或者不具备VFA条件下是不可能发生生物除磷的^[7~9]. 因此, 要达到同时脱氮除磷目的, 就必须创造微生物需要的好氧、缺氧、厌氧3种

收稿日期: 2009-12-15; 修订日期: 2010-03-11

基金项目: 新加坡环境与水工业发展协会项目(EDBS07/1-53974082); 北京市高校人才强教深化计划高层次人才项目(PHR20090502); 北京市教委科技创新平台项目(PXM2008_014204_050843); 北京工业大学研究生科技基金项目(ykj-2009-2752)

作者简介: 王丽(1985~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为污水生物处理, E-mail: wangli1129@emails.bjut.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: pyz@bjut.edu.cn

生理环境. 各国学者根据厌氧、缺氧、好氧等池子的大小、排列、数量增减以及混合液循环和回流方式的变化, 开发出了一系列生物脱氮除磷工艺和技术. 目前比较成熟的生物同时脱氮除磷工艺分为 3 种系列: A²/O 系列、SBR 系列和氧化沟系列^[10].

循环式活性污泥法 (cyclic activated sludge technology, CAST) 是 SBR 的一种变型工艺, 因具有投资及运行费用低、运行简单灵活及其选择器能防止污泥膨胀和主反应区内可进行同步硝化反硝化等特点在众多污水处理工艺中脱颖而出^[11, 12]. 目前, 在美国、加拿大、澳大利亚等国已有 270 多家污水处理厂应用此法, 其中 70 多家用于处理工业废水, 国内也开始对此进行研究并逐步在制药、啤酒、印染和化工等行业废水处理的实际工程中得到应用. 张统等^[13] 结合研究结果和实际经验, 提出了连续进水周期循环曝气活性污泥法, 并对该工艺在处理制药废水、低温下处理生活污水等方面进行了研究. 该工艺已经在北京航天城、北京第三制药厂等废水处理工程中得到应用. 王少坡等^[14] 研究了 CAST 工艺中 DO 浓度对系统硝化过程中 NO₂⁻ 积累的影响, 将硝化过程控制在亚硝酸盐阶段, 从而实现节能和减少后续反硝化过程中有机碳源的需求量.

然而, 传统 CAST 工艺运行方式也有其局限性, 由于缺少缺氧、 工况, 其脱氮性能受到限制, 而且, 采用固定时间长度的控制方式不能适应进水水量、水质的变化, 从而使得工艺对污染物的去除效率不稳定, 出水水质得不到保证. 为加强 CAST 工艺的脱氮除磷性能, 马娟等^[15] 提出了交替缺氧/好氧 (A/O) 分段进水的 CAST 运行方式处理低碳低比的生活污水, 使系统在缺氧段时可充分利用进水中的 COD 作为反硝化碳源, 并且能促进厌氧放磷. 研究表明, 与传统 CAST 工艺相比, 平均交替 3 次缺氧/好氧 CAST 工艺的脱氮能力可提高 20%, 并且能有效地抑制污泥膨胀.

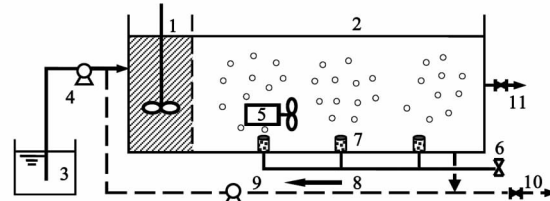
本研究主要考察采用交替 A/O 运行方式 CAST 工艺处理实际生活污水时, 不同碳氮比 (COD/TN) 与 HRT_s (选择器内水力停留时间) 对系统去除营养物性能的影响.

1 材料与方

1.1 试验装置

试验所用 CAST 装置如图 1 所示. CAST 装置由有机玻璃制作, 总容积 110 L, 有效容积 72 L, 在反应器的前端设有生物选择器, 其容积可以通过变化

有机玻璃隔板的位置来进行改变. 反应器的运行由定时器自动控制, 根据需要对进水、 、曝气、回流、沉淀各过程的启动、停止时间进行调整. 整个试验过程均在室温下进行, 进水及回流污泥分别由 2 台蠕动泵供给; 曝气气源由空气压缩机提供, 采用粘砂块曝气头, 由转子流量计控制气量. 选择器和主反应区中均设有 、 器, 保持泥水混合均匀.



1. 生物选择器; 2. 主反应区; 3. 进水水箱; 4. 进水泵;
5. 、 器; 6. 空压机; 7. 曝气头; 8. 回流污泥;
9. 回流污泥泵; 10. 剩余污泥; 11. 出水

图 1 CAST 工艺试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of CAST process

1.2 试验运行方案

本试验中 CAST 工艺采用分段进水, 交替 3 次缺氧/好氧的运行方式. 系统在缺氧、 一段一直进水, 好氧段只曝气. 1 周期为 6 h, 其中交替 A/O 反应 4 h (进水、 和好氧曝气均递减进行, 时间分别为 60、40、20 min), 沉淀 1 h, 排水 0.17 h, 闲置 0.83 h. 试验过程中, 系统每天运行 4 周期, 每周期排水比为 1/3, 污泥回流比为 20%, 主反应区内污泥浓度 (MLSS) 维持在 3 000 ~ 3 500 mg/L, 污泥龄为 10 d 左右, 系统水力停留时间 (HRT) 为 18 h. 试验分 6 个工况进行 (见表 1). 每工况都有 15 d 的污泥适应期, 待系统运行稳定后开始取样检测混合液的 SV、SVI、MLSS、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、PO₄³⁻-P 和 COD 等参数, 并在线监测 DO、ORP 和 pH 值.

1.3 试验用水

试验用水取自北京工业大学教工家属区化粪池, 该污水 COD/TN 偏低 (约 2.6). 根据试验需求, 本研究所用实际水质为向原污水中投加定量的无水乙酸钠所得. 试验各运行工况运行条件及进水水质如表 1 所示.

1.4 分析项目及方法

水样分析项目中 NH₄⁺-N 采用纳氏试剂光度法; NO₃⁻-N 采用麝香草酚分光光度法; NO₂⁻-N 采用 N-(1-萘基) 乙二胺光度法; COD 采用 5B-3 型快速测定仪; TN 为 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N 及 NO₃⁻-N 之和; PO₄³⁻-P 采用钼锑抗分光光度法. DO、ORP 和 pH 值采用

表 1 CAST H 各工况运行条件及进水水质

Table 1 Operational condition and the major characteristics of influent in CAST during different sets

工况	COD/TN	HRT _s /h	COD/mg·L ⁻¹		NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹		PO ₄ ³⁻ -P/mg·L ⁻¹		TN/mg·L ⁻¹	
			范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值
1	2.6	1.8	176.5 ~ 230.1	206.0	72.4 ~ 83.3	80.1	5.7 ~ 6.1	5.9	73.6 ~ 85.9	81.2
2		5.0	186.3 ~ 254.2	222.1	75.1 ~ 81.6	76.8	5.6 ~ 6.4	6.1	76.2 ~ 83.5	80.1
3		1.8	151.6 ~ 294.2	212.8	52.3 ~ 74.7	62.3	4.1 ~ 7.3	6.2	53.3 ~ 75.7	62.7
4	3.5	5.0	149.9 ~ 312.4	242.2	52.3 ~ 76.8	67.8	3.9 ~ 7.5	6.0	52.9 ~ 77.3	70.3
5		1.8	261.1 ~ 330.5	301.8	56.4 ~ 69.9	63.3	5.7 ~ 6.3	6.2	57.6 ~ 72.7	64.2
6	4.4	5.0	269.3 ~ 379.7	322.5	68.3 ~ 85.5	73.4	5.1 ~ 6.0	5.8	69.2 ~ 87.5	74.3

WTW Multi 340i 多功能在线测定仪;总碱度、MLSS、VSS 均按国家环保局发布的标准方法测定。

1.5 污泥的培养和驯化

本试验以北京市酒仙桥污水处理厂氧化沟内的污泥为种泥,培养驯化历时 2 个月,前 1 个月采用瞬时进水,限制性曝气,当 MLSS 达到 3 000 mg/L 左右时,定期监测出水水质,当出水 COD 低于 50 mg/L、NH₄⁺-N 去除率达 95% 以上时结束驯化。试验所得数据均以改变运行条件待系统稳定后开始记录。

2 结果与分析

2.1 有机物的去除性能

图 2 为 HRT_s 是 1.8 h 和 5 h 条件时,不同

CON/TN 比下系统每天 COD 进出水浓度及其去除情况。由图 2(a) 可知,当 HRT_s 为 1.8 h,进水 CON/TN 比分别为 2.6、3.5 及 4.4 时,系统对 COD 的去除率分别为 82.1%、87.1% 及 89.6%,出水 COD 均小于 50 mg/L。由此可见,提高进水 CON/TN 比并未造成 COD 去除率的明显改变,这是因为采用交替 A/O 运行方式时,有效缺氧段的引入使得该阶段进入系统的碳源被充分利用,主要用于反硝化前一好氧段内产生的 NO₃⁻-N。此外,反硝化后期若系统内 NO₃⁻-N 浓度较低且仍有碳源富余时,聚磷菌便会利用这部会碳源进行厌氧放磷^[16]。进水 COD/TN 比越高,系统内反硝化菌与聚磷菌对碳源的利用率越高。因此,系统有机物去除率稳定。

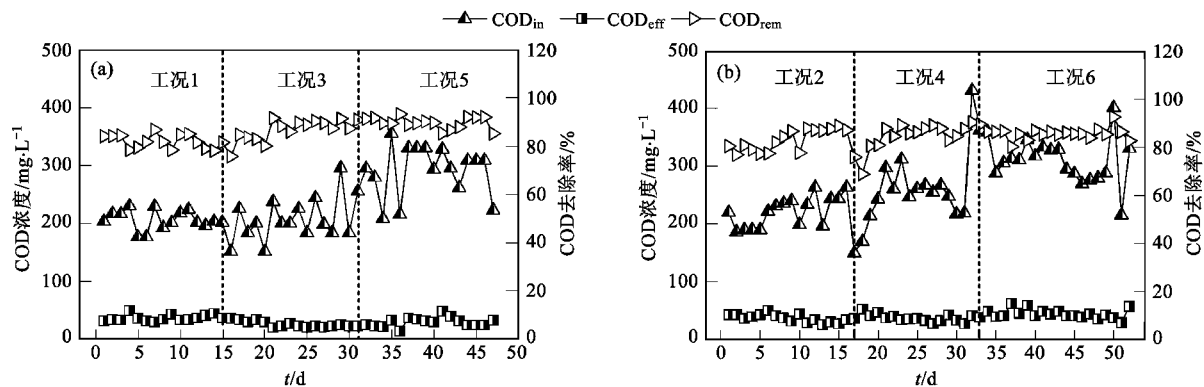


图 2 不同 CON/TN 比下有机物的去除性能

Fig. 2 Performance of COD removal under different CON/TN

将 HRT_s 由 1.8 h 增至 5 h 后,不同 COD/TN 下系统对 COD 的去除率变化幅度较小,分别为 83.4%、85.5% 和 86% [图 2(b)]. HRT_s 增大则主反应区好氧水力停留时间相应缩短。本研究中尽管缩短了好氧水力停留时间,但系统对有机物的去除性能并未受到影响,去除率在 80% 以上,出水 COD 平均小于 50 mg/L。这是因为采用交替 A/O 运行时,在缺氧段系统内的微生物充分利用有机碳源进行反硝化并促进放磷;而在好氧段,由于系统内的有机物

负荷降低且当有机物与氨氮同时存在时,异养菌会优先利用 O₂ 降解有机物^[17]。因此,缺氧段残余少量的 COD 则会在紧接着的好氧段内被优先去除,缩短好氧水力停留时间并未影响有机物的去除性能。

2.2 NH₄⁺-N 及 TN 的去除性能

图 3 为 HRT_s 是 1.8 h 和 5 h 条件时,不同 CON/TN 比下系统内每天 TN 进出水浓度及 NH₄⁺-N、TN 的去除情况。由图 3(a) 可知,当 HRT_s 为 1.8 h 时,随着进水 CON/TN 的增大,TN 去除率

不断提高,分别为 62.9%、72.1% 和 86.3%,出水 TN 分别为 31.1、17.4 和 8.8 mg/L. 系统对 NH_4^+-N 的去除率均维持在 98% 以上,出水 TN 则以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$

为主. 这是因为进水 COD 浓度越高,越有利于反硝化脱氮,且缺氧段反硝化产生的碱度也促进了好氧段硝化反应的进行,从而提高 TN 去除率^[18].

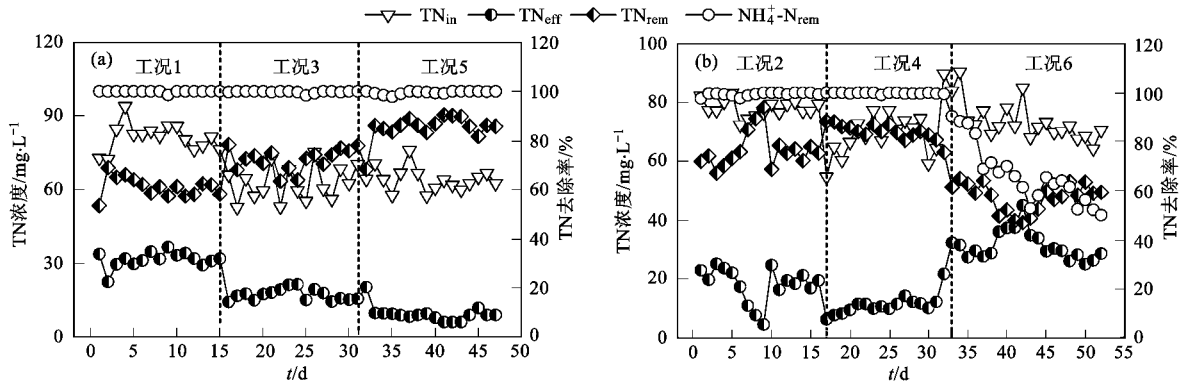


图3 不同 CON/TN 比下 NH_4^+-N 及 TN 的去除性能

Fig. 3 Performance of NH_4^+-N and TN removal under different CON/TN

由图 3(b) 可知,当 HRT_s 为 5 h,进水 COD/TN 分别为 2.6、3.5 时,系统内硝化完全,出水 $\text{NH}_4^+-\text{N} < 0.1 \text{ mg/L}$;TN 去除性能则因为进水 COD 的提高而得到改善,去除率由 76.2% 升至 84.5%,出水 TN 为 10.6 mg/L. 进一步提高 COD/TN 比至 4.4 时,系统运行前 4 d 内 NH_4^+-N 去除率由 99.5% 逐渐下降至 83.3%. 长时间硝化不完全运行导致 TN 去除率下降,由 84.5% 降至 58.2%.

将工况 1 与工况 2、工况 3 与工况 4、工况 5 与工况 6 分别进行对比可知,当进水 COD/TN 比为 2.6 时, HRT_s 的增大使得系统对 TN 的去除性能略有改善(工况 1 与工况 2),TN 平均去除率由 62.9% 升至 76.2%;当进水 COD/TN 比为 3.5 时,增大 HRT_s 后(工况 3 与工况 4)系统对 TN 的去除率也由 72.1% 升至 84.5%. 这是因为增大 HRT_s 即延长了污水在选择器内的缺氧水力停留时间,更有利于完成由回流污泥带至选择器内的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的反硝化反应,从而提高 TN 去除率. 当进水 COD/TN 比为 4.4 时,增大 HRT_s 则意味着主反应区内好氧水力停留时间相应缩短,导致硝化反应时间减少,TN 去除率降低.

在工况 1、2、5、6 运行稳定时,对 1 个周期中主反应区内 pH 及 ORP 进行监测发现:在第一个缺氧段内,工况 1、2 主反应区内的 pH 曲线呈上升趋势[图 4(a)、4(b)],工况 5、6 主反应区内的 pH 曲线呈下降趋势[图 4(c)、4(d)]. 结合缺氧段结束时各工况下主反应区内 ORP 下降值(分别为 -20、

-61、-322 及 -371 mV)可知:在缺氧段时工况 1、2 的主反应区主要进行反硝化反应,反应器内呈缺氧状态;而工况 5、6 则由于进水碳源增多且碳源的进入速率大于反硝化速率,导致主反应区主要进行厌氧放磷并引起了 pH 曲线的快速下降,缺氧段结束时 ORP 的绝对值越大则说明厌氧放磷越充分^[19]. 在紧接着的好氧段中发现工况 1、5 的主反应区内的 pH 曲线都呈大幅度下降的趋势[图 4(a)、4(c)]表明主反应区内硝化反应速率较快,特别是工况 1 中由于好氧水力停留时间长,硝化时间充足,致使 pH 曲线上出现了表示硝化结束的“氨谷” Q_1 、 Q_2 [图 4(a)]. 在工况 6 中,由于试验中并未额外投加碱度,因此厌氧放磷越充分对系统内碱度的消耗越大,导致 pH 曲线在好氧段末期出现象征碱度不足的平台^[20][图 4(d)]. 由此可知,当 COD/TN 比为 4.4, HRT_s 为 5 h 时系统内由于硝化反应时间的缩短及碱度的过度消耗致使硝化反应受限,TN 去除率降低.

2.3 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的去除性能

图 5 为 HRT_s 是 1.8 h 和 5 h 时,不同 CON/TN 比下系统内每天 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的进出水浓度及去除情况. 由图 5(a) 可知,当 HRT_s 为 1.8 h 时,各 CON/TN 比下磷的去除率分别 36.0%、40.1% 和 93.8%;由图 5(b) 可知当 HRT_s 为 5 h 时,各 CON/TN 比下磷的去除率分别 46.9%、56.2% 和 94.1%. 因此,当 HRT_s 不变时,提高进水 CON/TN 比有利于磷的去除. 但是前 4 个工况内 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的去除率波动范围较

大且去除率较低;而工况 5、6 中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率较高. 这是因为当进水 COD/TN 比较低(为 2.6、3.5)时,缺氧段系统内残留大量的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$,而此时进水中碳源较少,反硝化菌会与聚磷菌共同竞争有机物进而影响厌氧放磷,从而导致系统除磷性能的不稳定并且去除率较低. 当进水 COD/TN 比较高(为 4.4)

时,由于进水中的 COD 的增加使得碳源不再成为抑制厌氧放磷的影响因素,而放磷越充分越有利于好氧吸磷及磷的去除^[18],因此系统对磷的去除率得到提高. 研究还发现,工况 5、6 中进水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的浓度降低时除磷率有所下降,这是因为当系统内 COD 负荷相近时进水磷越高越有利于除磷,反之亦然^[18].

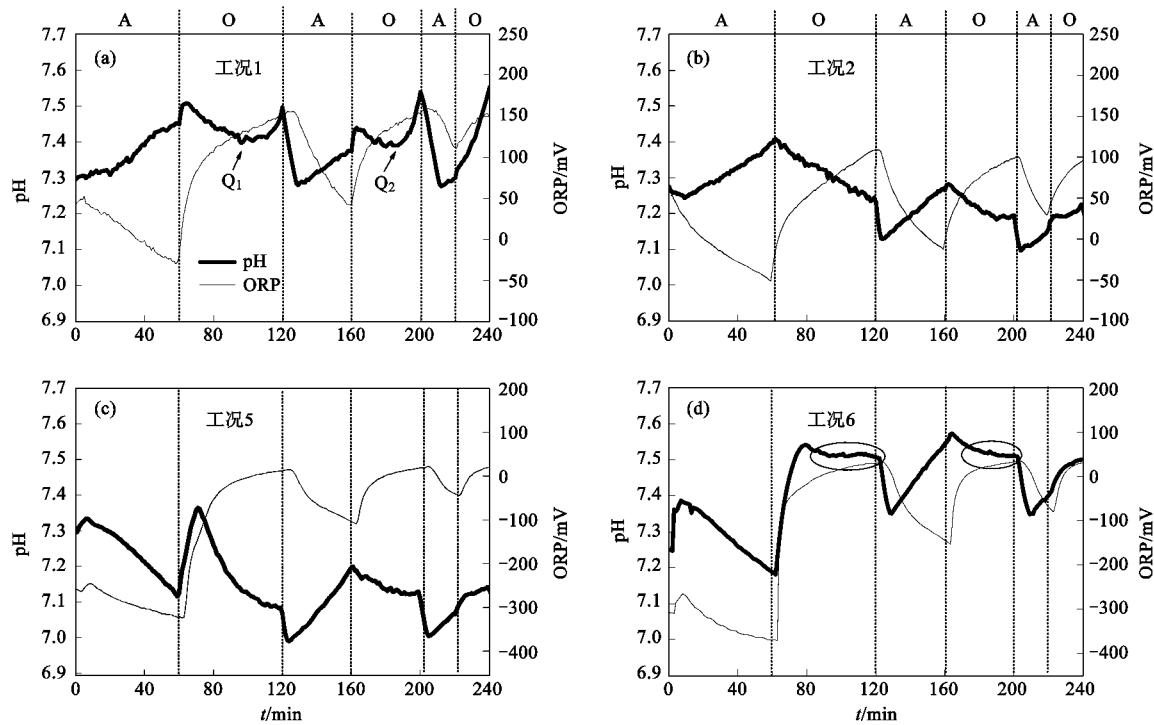


图4 各运行工况下1周期内 pH 和 ORP 的典型变化

Fig. 4 Profiles of pH value and ORP in main aeration zone

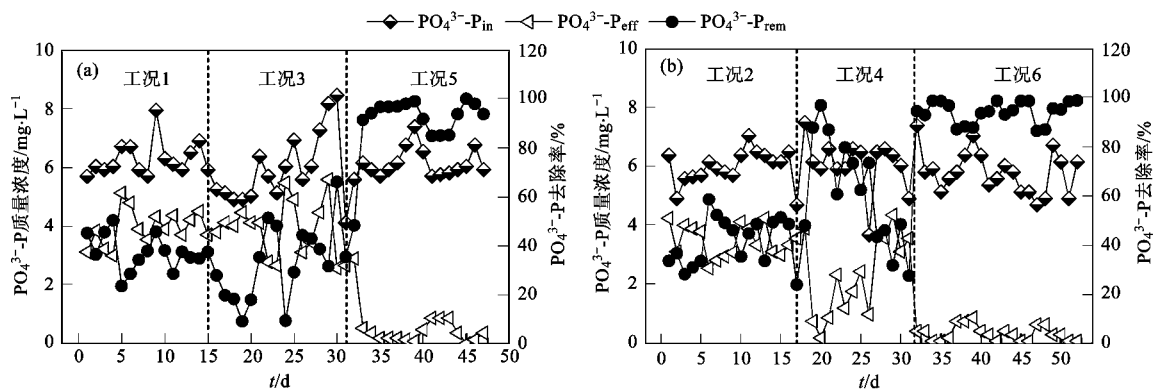


图5 不同 CON/TN 比下 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除性能

Fig. 5 Performance of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ removal under different CON/TN

当进水 COD/TN 比分别为 2.6 和 3.5 时, TN 及磷的去除率都随着 HRT_s 增大而升高. TN 去除率越高表明系统出水中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度的越少,在一定程度上能够减少下一周期开始时系统内由于 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的存

在而对厌氧放磷的影响,从而有利于磷的去除. 当进水 COD/TN 比为 4.4 时,增大 HRT_s 引起了 TN 去除率的下降但对磷的去除率影响不明显,均维持在 93% 以上,出水磷 $< 0.5 \text{ mg/L}$. 这是因为进水 $\text{COD}/$

TN 比的提高使得碳源不再成为抑制厌氧放磷的影响因素;由图 4(c)、4(d)可知,2 种工况下缺氧段结束时 ORP 下降值分别为 -322 mV 及 -371 mV,虽然 ORP 并未出现明显的指示放磷结束的特征点,却可以证明此时反应器内为严格的厌氧状态,厌氧放磷充分,除磷效果好。

3 结论

(1)研究发现采用交替 A/O 运行方式时,有效缺氧段的引入使得该工况进入系统的碳源被充分利用.6 种不同运行工况下系统有机物去除率均维持在 82% 以上.因此,进水 COD/TN 比及 HRT_s 的变化对系统有机物去除性能影响不明显。

(2)HRT_s 对系统脱氮性能的影响与进水的 COD/TN 比有关.当进水 COD/TN 比为 2.6、3.5 时,系统氨氮去除率始终维持在 98% 以上,而 TN 去除率则随着 HRT_s 的增大而升高.当进水 COD/TN 比为 4.4, HRT_s 为 1.8 h 时,系统 TN 去除率升高至 86%;进一步增大 HRT_s 至 5 h,系统中由于碱度不足致使得硝化反应受到抑制,造成了氨氮积累, NH₄⁺-N 去除率由 99.5% 逐渐下降至 62.8%,长时间氨氮不完全降解而使 TN 去除率下降至 58.2%。

(3)研究还发现,提高 COD/TN 比和增大 HRT_s 均能改善系统的除磷性能.当进水 COD/TN 比不变时,增大 HRT_s 对磷的去除率影响不明显.而当 HRT_s 不变时,磷的去除率则随着进水 CON/TN 比的增大而升高.因此,进水碳源是除磷性能的主要限制因素。

参考文献:

- [1] 郑平. 新型生物脱氮理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 1-3.
- [2] Souza S M, Araújo O Q F, Coelho M A Z. Model-based optimization of a sequencing batch reactor for biological nitrogen removal [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(8): 3213-3223.
- [3] Adrian O, Paulo C L, Gilda C, *et al.* Advances in enhanced biological phosphorus removal from micro to macro [J]. *Water Research*, 2007, **41**(11): 2271-2300.
- [4] 何志茹, 霍玉龙, 张文胜. 生物脱氮除磷技术的新动向[J]. *环境科学与管理*, 2007, **32**(10): 97-99.
- [5] Ewa L, Magnus C, Karin J, *et al.* Carbon and phosphorus transformations in a full-scale enhanced biological phosphorus removal process [J]. *Water Research*, 1997, **31**(11): 2693-2698.
- [6] Romanski J, Heider M, Wiesmann U. Kinetics of anaerobic orthophosphate release and substrate up take in enhanced biological phosphorus removal from synthetic wastewater [J]. *Water Research*, 1997, **31**(12): 3137-3145.
- [7] Mulkerrins D, Dobson A D W, Collieran E. Parameters affecting biological phosphate removal from wastewater [J]. *Environment International*, 2004, **30**(2): 249-259.
- [8] Jignesh P, George N. Interaction of denitrification and P removal in anoxic P removal systems [J]. *Desalination*, 2006, **201**(1-3): 82-99.
- [9] 陈光秀, 袁林江, 韩玮. 生物脱氮系统中无厌氧释磷的生物除磷工艺[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(9): 1800-1805.
- [10] 金杭, 王淑梅. 生物脱氮除磷技术及其发展趋势[J]. *广州环境科学*, 2006, **21**(2): 9-13.
- [11] Goronszy M C. The Cyclic Activated Sludge System for resort area Wastewater Treatment [J]. *Water Science and Technology*, 1995, **32**(9/10): 105-114.
- [12] Goronszy M C. Co-current nitrification/denitrification and biological P-removal in cyclic activated sludge system plants by redox controlled cycle operation [J]. *Water Science and Technology*, 1997, **35**(1): 215-224.
- [13] 张统, 方小军, 张志仁. SBR 及其变法污水处理与回用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003. 229-233.
- [14] 王少坡, 彭永臻, 李军, 等. CAST 工艺处理低 C/N 废水中 DO 对 NO₂⁻ 积累的影响[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2005, **37**(3): 344-347.
- [15] 马娟, 彭永臻, 王淑莹, 等. CAST 工艺处理低 C/N 生活污水的强化脱氮性能[J]. *环境工程学报*, 2009, **3**(2): 233-238.
- [16] Beril S A, Aysenur U. The effect of an anoxic zone on biological phosphorus removal by a sequential batch reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2004, **94**(1): 1-7.
- [17] Third K A, Burnett N, Cord-Ruwisch R. Simultaneous nitrification and denitrification using stored substrate (PHB) as the electron donor in a SBR [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2003, **83**(6): 706-720.
- [18] Wang Y Y, Peng Y Z, Stephenson T. Effect of influent nutrient ratios and hydraulic retention time (HRT) on simultaneous phosphorus and nitrogen removal in a two-sludge sequencing batch reactor process [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(14): 3506-3512.
- [19] 王亚宜, 彭永臻, 王淑莹, 等. 碳源和硝态氮浓度对反硝化聚磷的影响及 ORP 的变化规律[J]. *环境科学*, 2004, **25**(4): 55-58.
- [20] 高景峰, 彭永臻, 王淑莹. SBR 法去除有机物、硝化和反硝化过程中 pH 变化规律[J]. *环境工程*, 2001, **19**(5): 21-24.