

研究论文

# CAST 工艺改良对系统强化除磷性能的影响

徐立杰<sup>1</sup>, 王淑莹<sup>1</sup>, 甘冠雄<sup>1</sup>, 陈祥东<sup>2</sup>, 彭永臻<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>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;

<sup>2</sup>大连泉水污水处理有限公司, 辽宁 大连 116037)

**摘要:** 传统 CAST 工艺广泛应用于国内各种规模城镇污水处理厂, 单凭生物法难以达到城市污水排放一级 A 标准。采用改良的 CAST 工艺, 在传统 CAST 工艺基础上引入主反应区独立的搅拌时序, 并在实际规模的污水处理厂进行工程示范。通过两阶段的试验, 逐步缩短曝气时间延长缺氧搅拌时间, 优化聚磷菌的代谢环境, 增强聚磷菌的竞争优势。经过改良后的 CAST 工艺 TP 去除率达到 89.1%, 较传统 CAST 工艺提高了 22%, 出水 TP 稳定达到一级 A 标准。静态试验结果表明改良后的工艺反硝化聚磷菌的比例有所增加, 吸收  $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  需消耗  $1.67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 。改良后的 CAST 工艺的反硝化效果得到改善, 出水  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  和 TN 均达到一级 A 标准, 并在提高出水水质的同时节省生化池电耗 10.4%。

**关键词:** CAST; 生物除磷; 污水处理厂; 一级 A 标准; 节能降耗; 反硝化除磷

DOI: 10.3969/j.issn.0438-1157.2011.05.033

中图分类号: X 703.1

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157(2011)05-1402-06

## Phosphorus removal performance of modified CAST process

XU Lijie<sup>1</sup>, WANG Shuying<sup>1</sup>, GAN Guanxiong<sup>1</sup>, CHEN Xiangdong<sup>2</sup>, PENG Yongzhen<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

<sup>2</sup>Dalian Quan Shui Sewage Treatment Limited Company, Dalian 116037, Liaoning, China)

**Abstract:** The first level A standard of the sewage discharge for phosphorus removal could not reach when only biological method is employed, such as the traditional CAST (cyclic activated sludge technology) process that has been widely used in municipal wastewater treatment plants. A modification for the traditional CAST process was made by introducing an independent stirring phase in the main reactor zone. The modified process has been demonstrated in a full-scale wastewater treatment plant. To optimize the metabolic environment for polyphosphate bacteria and to increase its competition ability, gradually the aeration time was shortened and the anoxic stirring time extended by two stage experiment. For the modified CAST process the efficiency of phosphorus removal is 89.1%, 22% higher than non-modified CAST process, and the first level A standard of the sewage discharge could be steadily reached for the effluent TP. The results of static tests showed that the modification of process can increase the proportion of denitrifying polyphosphate accumulating organisms, and that the removal of  $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ PO}_4^{3-}\text{-P}$  need consume of  $1.67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NO}_3^- \text{-N}$ . So, the denitrifying performance was also improved, and the concentration of  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  and TN in effluent both could meet the first level A standard with 10.4% energy saved.

2010-08-02 收到初稿, 2010-10-25 收到修改稿。

联系人: 彭永臻。第一作者: 徐立杰 (1985-), 女, 硕士研究生。

基金项目: “十一·五” 国家科技支撑计划重点项目

Received date: 2010-08-02

Corresponding author: Prof PENG Yongzhen, pyz@bjut.edu.cn

Foundation item: supported by the National Key Technology

R&D Program for the 11th Five-Year Plan (2006BA19B03).

(2006BA19B03).

**Key words:** CAST; biological phosphorus removal; wastewater treatment plant; the first level A standard; energy conservation; denitrifying polyphosphate removal

## 引言

污水处理厂出水排放成为水体氮、磷污染的重要点源,提高污水厂氮、磷去除率对控制水体富营养化至关重要。一般认为,水体形成富营养化的指标是:水体中含氮量大于  $0.2 \sim 0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,含磷量大于  $0.01 \sim 0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,生化需氧量大于  $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [1],可见,即使污水处理达到城市污水排放一级 A 标准,对自然的危害仍很严重。为有效控制和缓解富营养化现象,国内外污水排放标准日趋严格,污水厂都将面临深度脱氮除磷的考验。目前污水处理除磷技术主要分为生物除磷和化学除磷,相比于化学除磷法,生物除磷工艺以其经济、有效性得到广泛应用[2],但要想取得较高的除磷效率对工艺和运行条件的要求也比较严格。

CAST 工艺因其具有同时去除有机物、脱氮、除磷且处理成本较低并且能有效预防污泥膨胀而被广泛应用。但作为 SBR 的衍生工艺,CAST 工艺为单一污泥悬浮生长系统,利用同一反应器中的混合微生物种群完成有机物氧化、硝化、反硝化和除磷,存在于系统中的异养菌、聚磷菌、硝化细菌和反硝化细菌存在泥龄、碳源、溶解氧等多方面竞争,彼此影响相对严重,在实际应用中限制了其处理效果,也给控制提出了非常严格的要求[3]。

CAST 工艺运行模式比较灵活,就一般生活污水而言,由于进水(厌氧)、沉淀和滗水的时间基本上是固定的,但好氧时间可以变化,因此 CAST 工艺的处理周期主要有 4 h 和 6 h 两种[4]。根据水质水量实际需求调整不同的运行时序,不同运行模式下除磷效果也存在一定差别。国内对于 CAST 工艺不同模式的除磷效果研究基本围绕不同周期时间以及曝气模式(限制性和非限制性)。师金香等[5]对 3h、4h、6h 和 8h 四种运行周期,限制性曝气和非限制性曝气两种进水-曝气方式的 CAST 工艺除磷效果进行了对比研究,不论周期为几小时,TP 去除率随反应器的主反应池与预反应池的比例大小、回流比的增加而增加。马娟等[6-7]对 CAST 分段进水工艺的除磷性能进行研究,除磷性能稳定去除率在 90% 以上,并且对系统反硝化除磷情况进行了深入的研究,聚磷菌在分段进水交替缺氧/

好氧模式下有较强的反硝化除磷能力。但是针对实际规模的 CAST 污水处理厂进行工艺改良的研究还未有报道。

试验以大连市泉水污水处理厂的实际情况 CAST 工艺为研究对象,并对其中 1 个生化池进行工艺改良,通过引入主反应区的独立搅拌时序,以期增强聚磷菌的相对生长优势。比较优化的 CAST 工艺与传统 CAST 工艺在处理效果上的差别,着重分析改良工艺对聚磷菌的代谢和竞争所起的作用以及系统反硝化除磷性能,以期对已建和待建的污水处理厂的运行提供一些参考经验。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验装置及运行方式

泉水污水处理厂的 CAST 反应池(共四座,1~4号)单池规模为  $29 \text{ m} \times 58 \text{ m} \times 5.8 \text{ m}$ ,试验期间日处理水量  $3.3 \sim 3.5$  万吨,充水比随进水量在  $0.23 \sim 0.24$  之间变化。采用 6 h 周期的运行模式,污泥回流比始终保持 20%。选取 1 号生化池进行工艺改良,2 号作为参比,试验期间 1 号、2 号池污泥浓度保持近似,在  $5000 \sim 6000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  之间,系统曝气量始终保持  $3000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  未作调整。改良后的 CAST 工艺如图 1 所示,在主反应区增加 3 台高速推流器,引入主反应区独立的搅拌

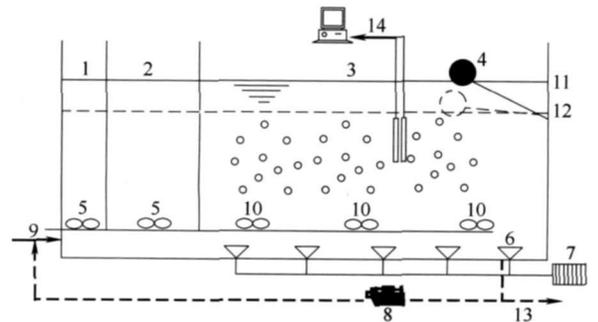


图 1 改良的 CAST 工艺示意图

Fig. 1 Schematic diagram of modified CAST process

- 1—selector; 2—anoxic hydraulic zone; 3—main reaction zone; 4—decanter; 5—original stirrers; 6—air diffuser; 7—air pump; 8—returned activated sludge pump; 9—influent; 10—newly added stirrers; 11—maximum liquid level; 12—minimum liquid level; 13—excess sludge; 14—DO (temperature), pH sensors

时段。2 号池采用传统运行模式 (图 2a), 进水 1.5 h, 进水 1 h 后开始曝气, 曝气 3 h, 沉淀排水各 1 h。试验分两个阶段: 第一阶段进水同时主反应区进行搅拌, 进水与搅拌保持同步, 曝气 2.5 h (图 2b); 第二阶段进一步延长搅拌时间, 进水结束后继续搅拌 15 min, 曝气 2.25 h。

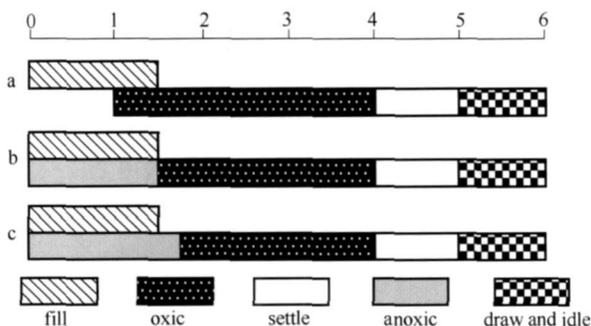


图 2 CAST 工艺运行时序

Fig 2 Operation mode of CAST process

### 1.2 静态试验

第二阶段稳定后分别在 1 号、2 号生化池选择区进水结束时刻取泥水混合液 2 L 考察污泥除磷性能。取回后继续搅拌 30 min 使聚磷菌释磷充分后用久置自来水清洗三次以去除残余 COD, 再各分为两份置于 1 L 抽滤瓶中: SBR1A, SBR1O, SBR2A, SBR2O (A 在缺氧条件下运行 5 h, O 在好氧条件运行 5 h)。

采用合成废水进行试验, 在采集的 1 号生化池出水中投加  $K_2HPO_4$  和  $NH_4Cl$  作为小试的原水, 使 4 个 SBR 中  $PO_4^{3-}-P$  和  $NH_4^+-N$  的初始浓度分别为  $6\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $12\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ; 另在 SBR1A 和 SBR2A 原水中投加  $KNO_3$  作为缺氧吸磷的电子受体, 使初始  $NO_3^- - N$  浓度  $30\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 保证缺氧吸磷时有足够的电子受体。好氧条件运行的 SBR1O 和 SBR2O 中, 初始 DO 控制在  $1\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  左右。

### 1.3 试验水质及分析方法

处理污水为生活污水, 其综合水质范围 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ): COD 250~420、 $BOD_5$  130~230、 $NH_4^+-N$  18~45、TP 4~7、SS 150~340、pH 6.8~8.5, 试验测定各项指标均采用国家环保总局颁布的标准分析方法测定, DO 采用 WTW340i 测定仪检测。单池出水指标均为排水 0.5 h 左右在滗水器旁边耳池取样, 缺氧搅拌结束后水样是在池中沿池长等距离取三处泥水混合样混

合沉淀过滤后上清液测定。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 原有传统 CAST 工艺除磷性能分析

污水 COD/TN 和 COD/TP 分别约为 9 和 50, 原水碳源相对充足, 理论上可以较好地满足工艺脱氮除磷需求。图 3 总结了该厂传统 CAST 工艺连续一年 (2008.09~2009.08) 的 TP 去除情况。经 CAST 工艺处理后出水 TP 较稳定, 在  $1.5\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  左右, 大部分时间未达到城市污水排放一级 B 标准, 除磷效率在 70%~80%。随着进水 TP 浓度的升高, 系统除磷效率随之提高, 这与实验室规模的除磷系统研究结论相符, 适当提高进水磷浓度将有利于聚磷菌的竞争优势, 聚糖菌的生长会得到抑制<sup>[8]</sup>。

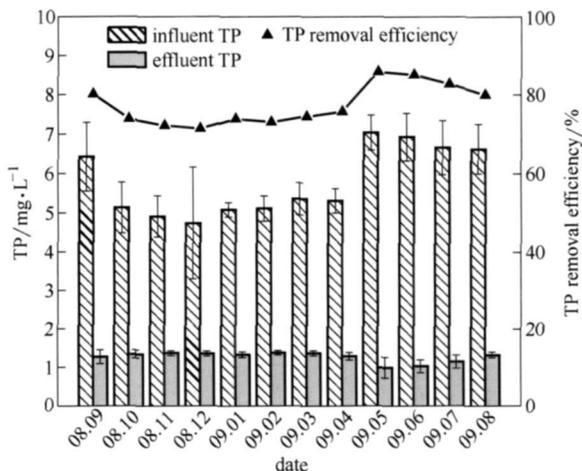


图 3 传统 CAST 工艺除磷效果

Fig 3 Phosphorus removal performance of traditional CAST process

污水在主反应区的好氧停留时间为 12.5~13.0 h, 曝气阶段 DO 在  $0.5\text{~}2.0\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 曝气结束前 DO 可达到  $4\text{~}5\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。尽管好氧条件对聚磷菌吸磷十分有利, 原有工艺仅依靠生物法也很难达到一级 A 标准。由于传统 CAST 工艺主反应区中不设泥水混合设备, 只靠曝气实现泥水混合, 而曝气阶段聚磷菌只能进行吸磷, 这一过程进行的程度是受其在厌氧条件下释放磷的程度以及体内储存的能源物质 PHAs 影响的<sup>[9]</sup>。传统 CAST 工艺完整周期中适合聚磷菌释磷的环境主要是前段生物选择区以及主反应区中的非曝气阶段, 但主反应区非曝气阶段溶解性有机物 (SCOD) 含量很少, 不可能达到很好的释磷效果。此外, 污水在生

物选择区的停留时间相对较短, 生物选择区中由于进水波动混入溶解氧, 回流污泥中较高的硝态氮浓度破坏了严格的厌氧环境, 加之聚磷菌与反硝化菌存在碳源的竞争, 这些因素综合限制了聚磷菌在整个系统中的生存优势, 使 TP 的去除受到一定的限制。鉴于系统好氧吸磷环境比较优越, 欲改善除磷效果需要给聚磷菌提供一个较好的释磷环境。

### 2.2 改良的 CAST 工艺除磷效果

第一阶段共持续 15 d, 第二阶段连续监测 20 d, 运行效果如图 4 所示。引入缺氧搅拌后 1 号池出水 TP 呈现逐渐降低趋势, 启动一周后出水 TP 稳定达到  $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以下, 第一阶段出水 TP 最小为  $0.65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 平均去除率 81.2%, 最高去除率可达到 88.2%。第一阶段改良后的 CAST 工艺 TP 去除率比传统 CAST 工艺提高约 10%。第二阶段出水 TP 比前一阶段继续减小, 后期稳定达到一级 A 标准 ( $< 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 平均去除率 89.1%, 比第一阶段又提高了 7.9%。而第二阶段 2 号池 TP 去除率平均为 66.9%, 改良后的工艺除磷效率提高了 22%, 缺氧搅拌段的引入对聚磷菌的代谢起到了促进作用。

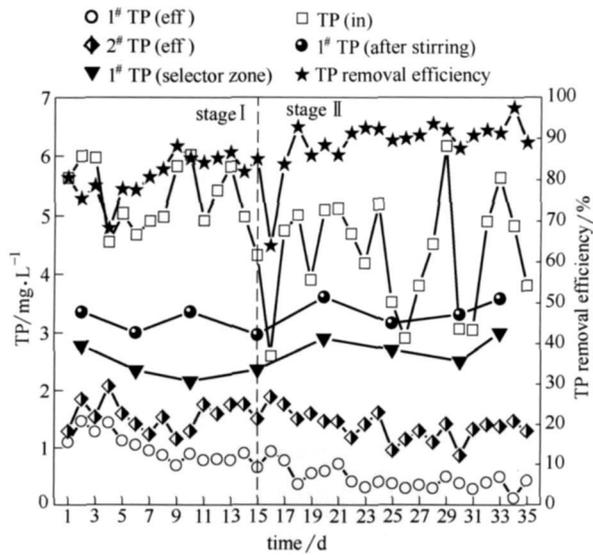


图 4 优化 CAST 工艺除磷效果

Fig. 4 Phosphorus removal performance of optimized CAST process

1 号池缺氧搅拌结束后的 TP 浓度在  $3.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  左右, 由于系统交替处于好氧/缺氧/厌氧的状态, 加之系统可能存在反硝化吸磷的现象, 在主反应区中的净释磷量很难计算, 但在前段选择区进水结束后取样测定 TP 浓度发现比主反应区搅拌结束

时的 TP 浓度少  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  左右, 可见释磷作用能够在主反应区得到强化。2 号生化池采用传统 CAST 模式, 仅有 20% 的回流污泥在选择区中能够与进水中的有机物充分混合, 当水流进入主反应区以后, 由于主反应区的微生物与进水不能够充分混合, 进水中的 SCOD 不能被充分利用, 而是被接下来的好氧阶段异养菌消耗掉, 不但造成碳源的浪费, 同时导致磷的去除受到限制。改良工艺通过主反应区的独立搅拌段的引入, 使得全部污泥都能够与原水中的碳源充分接触, 释磷更加充分。第二阶段缩短 45 min 曝气时间不但没有影响吸磷速率, 反而通过缺氧搅拌使得聚磷菌在曝气之前得到充分的释磷准备, 在好氧阶段更加高效吸磷。

从微生物竞争角度, 聚磷菌的世代时间较短, 适当缩短曝气时间使系统曝气阶段 F/M 增加, 在实际运行中明显感到污泥生长加快, 为维持与 2 号池近似的污泥浓度, 1 号池需加大排泥量, 可见泥龄相应缩短, 利于聚磷菌在活性污泥系统中的生存。

图 5 中比较了两个阶段运行过程中 1 号池与 2 号池出水  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  情况 (出水中几乎检测不到  $\text{NO}_2^- \text{-N}$ )。硝态氮对生物除磷的干扰有两种方式<sup>[10]</sup>: 厌氧区内的硝态氮会妨碍发酵作用的进行, 影响低分子脂肪酸的产生; 即使水中存在这样的脂肪酸, 硝态氮作为异养微生物的最终电子受体, 也会导致乙酸盐等低分子有机物的消耗。郑燕清等<sup>[11]</sup>研究发现释磷作用发生在反硝化结束后, 说明反硝化菌相比于聚磷菌在竞争碳源方面更有优

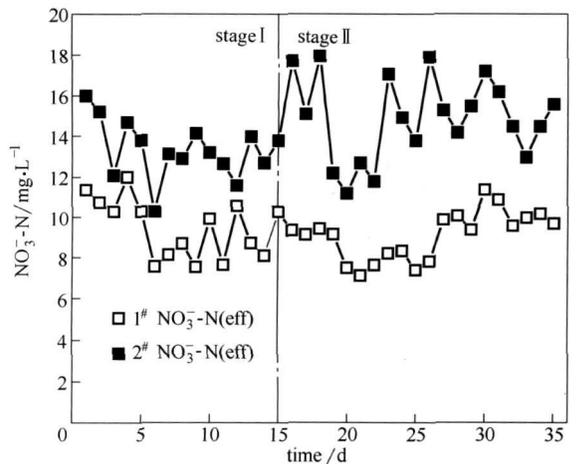


图 5 改进后的 CAST 工艺与传统 CAST 工艺反硝化效果

Fig. 5 Denitrification performance of modified

CAST and traditional CAST process

势, 使得聚磷菌得不到优势生长。从图中可以看出, 1号池经过工艺改良反硝化效果有很明显的提高, 出水  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  比 2号池减少约  $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 回流液中的  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  也相应降低, 从而减轻  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  对聚磷菌释磷的影响。

由于进水氨氮负荷较小, 曝气量充足, 缩短 45 min 曝气硝化效果没有受到影响, 1号、2号池出水  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  均保持在  $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  左右。由此, 改良后的 CAST 工艺出水  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  与  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  总和约为  $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 出水 TN 充分满足一级 A 标准。

改良后的 CAST 工艺由于缩短曝气时间, 减少了鼓风机用量, 在提高出水质的同时达到了节能降耗的目的, 积极响应我国节能减排的政策方针, 节约运行成本。在整个污水处理厂成本费用中, 电能的消耗占有巨大的组成部分, 污水厂主要的耗能设备是: 提升污水泵和回流泵、鼓风机和污泥加热设备。鼓风机是污水厂消耗能量最大的设备<sup>[12]</sup>。本试验选用的推流器功率为  $7.5 \text{ kW/台}$ , 而鼓风机功率高达  $90 \text{ kW}$ , 改良后的工艺每周期可节省生化池电耗为:  $90 \text{ kW} \times 0.75 \text{ h} - 22.5 \text{ kW} \times 1.75 \text{ h} = 28.125 \text{ kW} \cdot \text{h/周期}$ , 节省比例为  $28.125 \text{ (kW} \cdot \text{h/周期)} / 270 \text{ (kW} \cdot \text{h/周期)} = 10.4\%$ 。

### 2.3 不同工艺污泥吸磷性能

1号、2号池污泥的好氧吸磷情况如图 6 所示。前 0.5 h 吸磷速度较快, 之后速度减缓, 4 h 之后吸磷反应基本停止, 这是由于聚磷菌胞内储存的 PHAs 耗尽。从图中可以看出, SBR10 的好氧吸磷能力较 SBR20 略强, SBR10 和 SBR20 的比吸

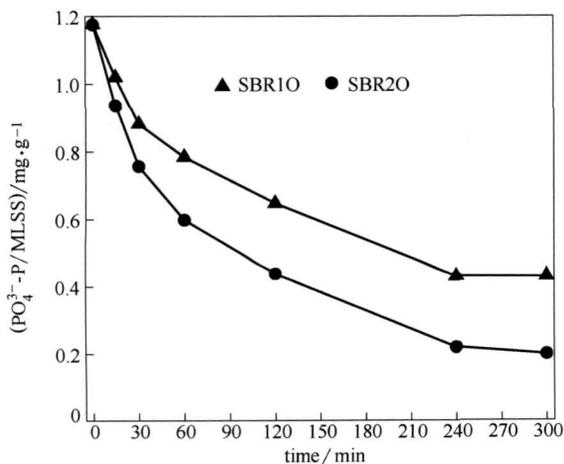


图 6 1号、2号池污泥好氧吸磷特性

Fig 6 Phosphorus uptake performance of sludge from 1# and 2# basin under aerobic condition

磷速率分别为  $0.224 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$  和  $0.186 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。从比吸磷速率绝对值来看, 聚磷菌在两种系统中的比例都很小, 而改良后的工艺运行一个多月后污泥中聚磷菌的比例较传统 CAST 工艺有所增加, 聚磷菌的相对优势得到加强。

从图 7 可以看出, SBR2A 在缺氧条件下仅吸收了  $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ , 而  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  相应减少了  $1.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ; 而 SBR1A 吸收了  $1.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ , 消耗了  $2.84 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 。可见, 2号池的污泥有较微弱的反硝化吸磷现象产生, 而 1号池的污泥的反硝化吸磷现象较为明显, 吸收  $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  需  $1.67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 。改良后的 CAST 工艺由于强化了缺氧环境, 微生物的生存环境发生变化, 主反应区中的缺氧环境加之外碳源的逐渐耗尽, 为反硝化聚磷菌提供了利于代谢的生境, 而且由于聚磷菌的释磷过程得到强化, 胞内储存 PHAs 也为反硝化吸磷提供了碳源基础, 从而使得污泥菌群结构发生一定的变化, 能够以  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  为电子受体的聚磷菌比例有所增加。

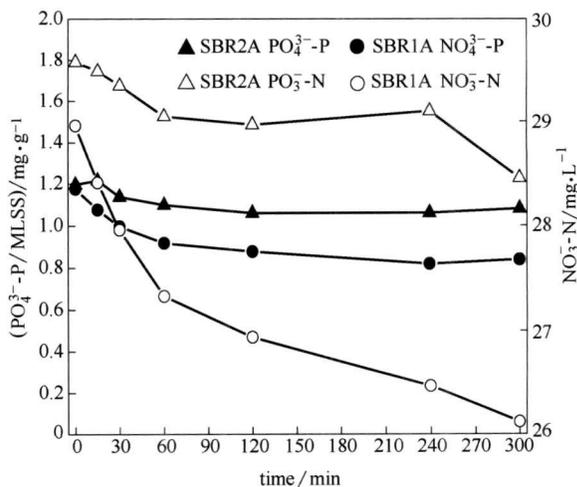


图 7 1号、2号池污泥反硝化吸磷特性

Fig 7 Phosphorus uptake performance of sludge from 1# and 2# basin under anoxic condition

### 3 结 论

(1) 采用传统 CAST 工艺 6 h 周期并且碳源充足的情况下, TP 去除率在 70% ~ 80% 之间, 进水磷浓度升高去除率随之提高, 出水 TP 多数情况下未能达到一级 B 标准。

(2) 通过工艺改良, 在主反应区增设独立缺氧

搅拌过程, 可以强化聚磷菌的竞争优势。通过两阶段的试验, 逐步缩短曝气时间, 增加搅拌段时间, TP 的平均去除率可达到 89.1%, 比传统 CAST 除磷效率提高了 22%, 出水 TP < 0.5 mg · L<sup>-1</sup>, 稳定达到一级 A 标准。

(3) TP 去除效果改善的同时反硝化效果也得到改善, 系统硝化能力没有受到影响, 出水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN 均满足一级 A 标准。

(4) 静态试验结果表明改良后的工艺反硝化聚磷菌的比例有所增加, 吸收 1 mg · L<sup>-1</sup> 的 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 需消耗 1.67 mg · L<sup>-1</sup> 的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N。

(5) 改良后的工艺可节省生化池电耗 10~40%。

## References

- [1] Chen Shuiyong (陈水勇), Wu Zhenming (吴振明), Yu Weibo (俞伟波), Lü Yifeng (吕一锋). Formation, harmfulness, prevention, control and treatment of waters eutrophication [J]. *Environmental Science and Technology* (环境科学与技术), 1999 (2): 11-15
- [2] Yin Jun (尹军), Wang Jianhui (王建辉), Wang Xuefeng (王雪峰), Xie Yancui (解艳萃), Huo Yufeng (霍玉丰), Tan Xuejun (谭学军). Influencing factors of biological phosphorus removal in sewage treatment [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering* (环境工程学报), 2007, 1 (4): 6-11
- [3] Ren Minghua (任明华). Study on the performance and optimum operation of CAST process [D]. Shanghai: Tongji University, 2007
- [4] Liu Huicheng (刘惠成), Chen Hang (陈航). Operating mode of CAST craft for municipal domestic sewage [J]. *Environment and Ecology in the Three Gorges* (三峡环境与生态), 2009, 2 (4): 30-32
- [5] Shi Jinxiang (师金香), Xiong Zhenhu (熊振湖), Wang Xiuduo (王秀朵). Effect of different running cycle on biological phosphorous removal from municipal wastewater by cyclic activated sludge technology [J]. *Journal of Tianjin Institute of Urban Construction* (天津城市建设学院学报), 2004, 10 (1): 33-35
- [6] Ma Juan (马娟), Peng Yongzhen (彭永臻), Wang Shuying (王淑莹), Wang Li (王丽), Liu Yang (刘洋), Ma Ningping (马宁平). Performance of advanced nitrogen removal with on-line control using step-feed CAST technology [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology* (中南大学学报: 自然科学版), 2010, 41 (2): 793-798
- [7] Ma Juan, Peng Yongzhen, Wang Shuying, Wang Li, Liu Yang, Ma Ningping Denitrifying phosphorus removal in a step-feed CAST with alternating anoxic-oxic operational strategy [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21: 1169-1174
- [8] Xue Tao (薛涛), Huang Xia (黄霞). Effect of high phosphate loading in sequencing batch reactors on enhanced biological phosphorus removal [J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology* (清华大学学报: 自然科学版) 2007, 47 (12): 2146-2162
- [9] Li Nan (李楠). Factors affecting BPR performance [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006
- [10] Li Yaxin (李亚新). Theory and Technology of Activated Sludge Process (活性污泥法理论与技术) [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007: 331
- [11] Zheng Yanqing (郑燕清), Zhou Jianhua (周建华). Research on influence factors of phosphorus release and uptake under aerobic and anaerobic conditions [J]. *China Municipal Engineering* (中国市政工程), 2007 (1): 48-50
- [12] Cao Manhe (曹满河). Analyze of the operation cost and the measure of control of urban sewage treatment plant [J]. *Environmental Protection* (环境保护), 2008 (14): 77-78