

# 改良 UCT 分段进水工艺处理生活污水性能优化研究

葛士建<sup>1</sup>, 彭永臻<sup>1\*</sup>, 曹旭<sup>1</sup>, 王淑莹<sup>1</sup>, 杨岸明<sup>1,2</sup>

(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. 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100038)

**摘要:** 在某大型污水处理厂采用中试规模的改良 UCT 分段进水脱氮除磷工艺处理低 COD/N 生活污水, 重点研究了流量分配比和原水营养元素比 (COD/N、COD/P 和 TN/P) 对工艺脱氮除磷性能的影响, 目的是分析探索工艺对有机物和氮磷去除机制和污泥特性。连续运行试验表明, 该工艺取得稳定高效的去除性能。在进水 COD 负荷为  $0.79 \sim 0.93 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ , 4 种流量分配比条件下, 平均出水 COD 浓度和去除率分别为  $(43.7 \pm 8.35) \text{ mg/L}$  和  $(83.8 \pm 3.86)\%$ , 且厌氧区和缺氧区对 COD 的去除贡献高达  $60.2\% \sim 76.2\%$ 。进水流量分配为  $40\%:30\%:30\%$  时可获得  $88.2\%$  的总氮去除率, 其中通过好氧同步硝化反硝化去除的占  $32.8\%$ , 出水氨氮 ( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ) 和总氮 (TN) 为  $(0.21 \pm 0.20) \text{ mg/L}$  和  $(7.90 \pm 1.27) \text{ mg/L}$ , 约占  $32.6\% \sim 39.5\%$  的反硝化聚磷菌对系统实现高达  $97.2\%$  的磷去除率有着重要作用。氮去除率与原水 COD/N 在  $4.64 \sim 7.41$  范围内呈线性正比关系 ( $R^2 = 0.96$ ), 磷去除率分别随原水 COD/P 和 TN/P 在  $35.0 \sim 92.5$  和  $6.24 \sim 12.5$  范围内增加而增加 ( $R^2 = 0.87$  和  $R^2 = 0.89$ )。系统平均 SVI 值为  $(82.6 \pm 4.99) \text{ mL/g}$ , 污泥沉降性能良好。

**关键词:** 分段进水; 进水流量分配; 脱氮除磷; 同步硝化反硝化; 反硝化除磷; UCT

**中图分类号:** X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2011)07-2006-07

## Optimization of a Modified UCT Step Feed Process Treating Municipal Wastewater

GE Shi-jian<sup>1</sup>, PENG Yong-zhen<sup>1</sup>, CAO Xu<sup>1</sup>, WANG Shu-ying<sup>1</sup>, YANG An-ming<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Beijing Drainage Group Co. Ltd., Beijing 100038, China)

**Abstract:** A pilot-scale modified UCT step feed process was proposed to treat the municipal wastewater with lower COD/N in a large-scale wastewater treatment plant. Effects of influent distribution ratios and nutrients ratios (COD/N, COD/P and TN/P) on nutrients removal capabilities were importantly investigated. The removal mechanisms of organics and nutrients and sludge characteristics were ultimately discussed. According to the continuous experiments, the stable and high process performance was obtained. The average COD removal efficiencies and effluent concentration of  $(83.8 \pm 3.86)\%$  and  $(43.7 \pm 8.35) \text{ mg/L}$  were achieved in the influent COD loading of  $0.79 \sim 0.93 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ . The COD removal in anaerobic and anoxic zones accounted for  $60.2\% \sim 76.2\%$ . With the influent distribution ratio of  $40\%:30\%:30\%$ , as much as  $88.2\%$  of TN removal efficiency was observed. It should be considered the removal of  $32.8\%$  through simultaneous nitrification and denitrification process. The average effluent  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  and TN were  $(0.21 \pm 0.20) \text{ mg/L}$  and  $(7.90 \pm 1.27) \text{ mg/L}$ , respectively. It was extremely important that as much as  $32.6\% \sim 39.5\%$  of the denitrifying phosphorus accumulation organisms contributed to the high phosphorus removal efficiency of  $97.2\%$ . A linear positive relationship was observed between nitrogen removal efficiency and COD/N in the range of  $4.64$  and  $7.41$  ( $R^2 = 0.96$ ). Phosphorus removal efficiency was found to be a function of the influent COD/P and TN/P, varying from  $35.0$  to  $92.5$  and from  $6.24$  to  $12.5$ , respectively ( $R^2 = 0.87$  and  $R^2 = 0.89$ ). In addition, the great sludge settleability was obtained with the mean SVI of  $(82.6 \pm 4.99) \text{ mL/g}$ .

**Key words:** step feed; inflow distribution ratios; nitrogen and phosphorus removal; simultaneous nitrification and denitrification (SND); denitrifying phosphorus removal; University of Cape Town (UCT)

污水排入自然水体之前, 必须将有机物和营养元素 (尤其氮磷) 去除。与物理-化学处理方法相比, 生物法在脱氮除磷效率和能耗费用方面具有明显优势。目前, 较为常用的生物活性污泥法工艺主要有前置反硝化工艺 (A/O)、厌氧/缺氧/好氧工艺 (A/A/O) 和开普敦工艺 (UCT) 等<sup>[1,2]</sup>。针对碳源充足或碳氮比 (COD/N) 较高的污水, 这些工艺表现出良好的脱氮除磷性能。但是, 对于低 COD/N 水质, 传统工

艺往往不能满足国家城镇污水排放标准的要求, 因而许多污水处理厂面临升级改造的问题。另外, 已建

收稿日期: 2010-08-29; 修订日期: 2010-10-27

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07317-007-105); 北京市属高等学校人才强教计划高层次人才资助项目 (PHR20090502); 北京工业大学第八届研究生科技基金项目 (ykj-2010-3738)

作者简介: 葛士建 (1987 ~), 博士, 主要研究方向为污水生物脱氮除磷工艺技术及过程控制, E-mail: gl-222@tom.com

\* 通讯联系人, E-mail: pyz@bjut.edu.cn

污水处理厂提高脱氮除磷效率,改善出水水质有以下 3 种措施:①优化现有工艺运行条件,提高自动控制水平;②耦合生物脱氮除磷新技术;③变革现有处理工艺。前 2 种方法相对经济有效,多被现有污水厂升级改造工程中接受采纳<sup>[3]</sup>。

分段进水 A/O 工艺是一种在传统 A/O 工艺基础上优化进水方式和提高有机碳源利用率的高效生物脱氮除磷工艺,许多学者研究了二段、三段和四段式分段进水工艺性能和特性,均表明该工艺在无需或少投加外碳源的条件下就可以获得较高的脱氮除磷效果<sup>[4~8]</sup>。然而,绝大多数研究采用人工配水为处理对象,而且仅关注工艺的脱氮性能。为了提高分段进水工艺实际应用价值和同步高效脱氮除磷效率,本课题组提出一种新型分段进水深度脱氮除磷工艺<sup>[9]</sup>。该工艺集 UCT 工艺和分段进水工艺优势于一体,无需硝化液内回流设施,污泥沉降性好,污泥浓度高,原水碳源利用率高等,尤其适用于处理低 COD/N 城市生活污水。

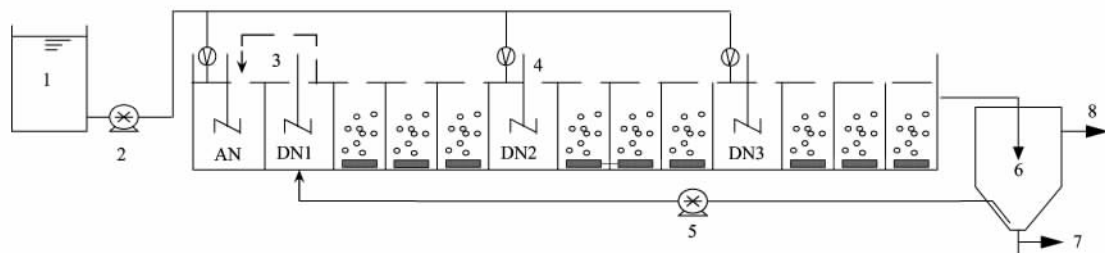
本研究试图以北京市某污水处理厂的生活污水

为处理对象,优化改良 UCT 分段进水工艺运行条件,探索工艺的脱氮除磷性能和各污染物去除机制。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置和试验方案

改良 UCT 分段进水深度脱氮除磷工艺(如图 1)采用三段式结构,第一段由厌氧池、缺氧池和好氧池组成,第二段和第三段均由缺氧池和好氧池串联组合而成。试验装置主反应器有效容积 340 L,有机玻璃材质,尺寸 50 cm × 60 cm × 125 cm,由 1 个厌氧区和 3 个连续交替缺氧区、好氧区组成。系统采用电磁式空气压缩机曝气,以黏砂块为微孔曝气器,转子流量计调节曝气量,进水及污泥回流通过蠕动泵控制。竖流式二沉池由有机玻璃制成,上部沉淀区呈圆柱形,直径为 50 cm,污泥斗为截头倒锥体,倾角为 60°,总高度为 90 cm,容积为 88 L,采用中心进水、周边三角堰出水方式。控制系统由传感器、现场仪表、实时过程控制器和上位机组成。整个过程可通过上位机进行监视、操作与控制。



1. 原水箱;2. 进水泵;3. 内循环系统;4. 搅拌机;5. 污泥回流泵;6. 二沉池;7. 剩余污泥;  
8. 出水;AN. 厌氧池;DN. 缺氧池;其它池体均为曝气池

图 1 改良 UCT 分段进水生物脱氮除磷工艺中试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of pilot-scale modified UCT step feed BNR process

试验分为两部分:第一部分试验分为 4 个阶段,考察 20% : 30% : 50%、30% : 40% : 30%、40% : 30% : 30%、50% : 30% : 20% 4 种不同的进水流量分配比对工艺的脱氮除磷性能的影响作用,每个阶段持续至少 3 个污泥龄的时间,以确保试验数据的可靠性。

第二部分主要考察进水水质(营养元素比)对系统脱氮处理效果的影响作用,通过向原水中投加适量乙酸钠、氯化铵和磷酸二氢钾来调整 COD/N 和 COD/P 分别为 4.63 ~ 7.41 和 35.0 ~ 92.5。此外还分析探讨了工艺脱氮除磷机制和系统污泥特性。

### 1.2 污水水质和种泥特性

本试验在北京某大型城市污水处理厂进行,该

污水厂采用 A/A/O 工艺,出水水质稳定可靠。试验采用初沉池出水为系统进水,其水质特征为: COD ( $308 \pm 172$ ) mg/L, TN ( $52.9 \pm 17.1$ ) mg/L,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  ( $51.0 \pm 18.8$ ) mg/L,  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  ( $0.07 \pm 0.32$ ) mg/L,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  ( $0.91 \pm 1.39$ ) mg/L,  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  ( $3.92 \pm 5.49$ ) mg/L, 总磷(TP) ( $6.43 \pm 6.22$ ) mg/L。接种污泥取自该厂的剩余污泥,驯化 15 d 后系统脱氮除磷性能基本稳定。

### 1.3 水质分析方法

水样首先经 0.45  $\mu\text{m}$  中速滤纸过滤,取滤出液按照标准方法测定  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 、COD 等指标<sup>[10]</sup>,采用德国 WTW level-2 pH 仪和探头测定 pH 和温度,采用 WTW, pH/oxi340i

仪测定氧化还原电位值 (ORP) 和溶解氧 (DO), 污泥浓度 MLSS 和挥发性污泥浓度 MLVSS 均采用标准方法测定.

#### 1.4 系统 SND 脱氮计算方法

系统通过 SND 途径去除的氮量和 SND 率可以通过公式 (1) ~ (4) 计算.

$$N_{\text{SND}} = N_{\text{influent}} - N_{\text{denitrification}} - N_{\text{assimilation}} - N_{\text{effluent}} \quad (1)$$

$$N_{\text{denitrification}} = N_{\text{DN1}} + N_{\text{DN2}} + N_{\text{DN3}} \quad (2)$$

$$N_{\text{assimilation}} = \text{MLSS}_{\text{waste}} \times f_{\text{VSS/SS}} \times V_{\text{waste}} \times f_{\text{N/biomass}} \quad (3)$$

$$\text{SND efficiency} = \frac{N_{\text{SND}}}{N_{\text{influent}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中,  $N_{\text{SND}}$ 、 $N_{\text{denitrification}}$  和  $N_{\text{assimilation}}$  分别为系统每天通过 SND、反硝化过程和同化作用去除的氮量, g/d;  $N_{\text{influent}}$  和  $N_{\text{effluent}}$  为每天进入系统的氮量, g/d;  $N_{\text{DN1}}$ 、 $N_{\text{DN2}}$  和  $N_{\text{DN3}}$  分别为各段缺氧区反硝化作用去除的氮, g/d;  $\text{MLSS}_{\text{waste}}$  为剩余污泥浓度, g/L;  $f_{\text{VSS/SS}}$  为挥发性污泥浓度 MLVSS 与 MLSS 的比值;  $V_{\text{waste}}$  是每天的剩余污泥排放量, L;  $f_{\text{N/biomass}}$  为活性污泥中氮的含量, 取 12.39%<sup>[11]</sup>.

## 2 结果与讨论

### 2.1 改良 UCT 分段进水工艺的有机物去除特性

生物法污水处理好氧曝气过程, 首先发生异养菌对有机物的氧化过程, 然后进行自养菌的氨氧化过程. 图 2 描述了 4 种不同进水流量分配比例下系统对有机物 (COD) 的去除效果. 由于采用污水处理厂的实际生活污水, 进水水质波动较大 (183.6 ~ 402.8 mg/L), 但是系统平均出水水质和去除率分别为 (43.7 ± 8.35) mg/L 和 (83.8 ± 3.86)%, 表现出较强的抗有机冲击负荷能力.

各段进水流量分配比对原水 COD 在工艺系统中的迁移转化途径, 以及对氮磷去除效率的贡献大小有着重要的关系. 由表 1 可以看出, 尽管 4 个阶段下进水流量分配比不同, 但是厌氧区或缺氧区 COD 的去除量要远远大于好氧区, 经物料衡算分析, 三段厌氧区或缺氧区有机物去除量分别占各段有机物流入量的 76.2%、70.4% 和 60.2%, 因此, COD 主要在厌氧区和缺氧区被聚磷菌、反硝化聚磷菌和反硝化菌等微生物有效利用, 该工艺可以最大程度地利用原水碳源, 对于处理低 COD/N 城市生活污水具有较强的竞争优势. 另外, 好氧区较低的有机物浓度在一定程度上减弱了异养菌和硝化菌对溶解氧的竞

争作用, 有利于硝化菌的繁殖生长和氨氧化反应的进行, 本试验条件下系统硝化几乎完全.

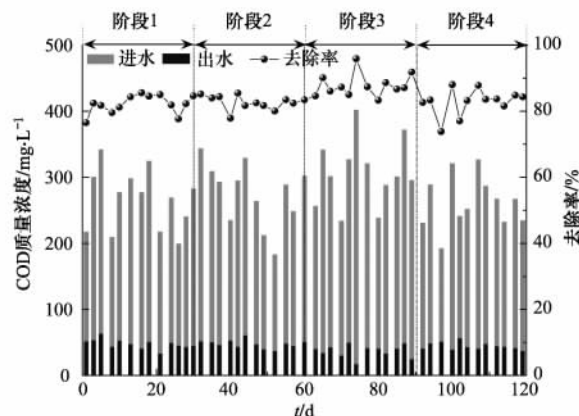


图 2 4 种进水流量分配比下的 COD 变化趋势

Fig. 2 Variation profiles of COD with four influent distribution ratios

### 2.2 系统氮的去除机制分析

分段进水工艺各段缺氧区反硝化反应为好氧硝化反应提供充足的碱度, 是系统硝化反应顺利进行的前提条件. 如图 3 所示, 除阶段 1 外, 其它 3 种流量分配条件下出水氨氮基本为零, 硝化反应彻底. 另外, 各格室的水力停留时间 (HRT) 沿工艺流程逐渐减小<sup>[12]</sup>. 前 30 d 第三段进水流量比为 50%, 导致好氧区 HRT 过短, 氨氧化过程没有充足时间进行, 出水仍有部分氨氮剩余. 阶段 2, 末段进水比减少为 30%, 系统硝化效果和总氮去除性能均得到改善, 出水氨氮和总氮分别为 0.09 mg/L 和 12.7 mg/L. 继续提高首段进水比至 40%, 首段厌氧区和缺氧区有机物大大增加, 反硝化速率相应提高, 总氮去除率达 84.9%. 然而阶段 4, 首段进水流量比过高 (50%) 导致好氧区氨氮氧化不彻底, 严重影响后续两段缺氧区反硝化反应效果, 进水碳源没有被有效利用, 系统出水含有较高的硝态氮, 总氮去除率降低. 可见, 对于分段进水工艺来说, 其它运行条件相同的条件下, 各段进水流量分配比将直接决定系统的脱氮除磷性能<sup>[13,14]</sup>, 对于特定的进水水质和工艺均存在最佳的进水流量分配. Larrea 等<sup>[7]</sup>以三段式 A/O 分段进水工艺处理实际生活污水, 研究发现在进水流量分配比为 40%:40%:20% ~ 33%:33%:34% 情况下, 系统具有高效脱氮除磷性能, 而 Vaiopoulou 等<sup>[14]</sup>研究表明最佳的流量比为 60%:25%:15%. 本试验条件下, 以北京实际生活污水为研究对象, 阶段 3 采用的 40%:30%:30% 可以获得各污染物的同步深度去

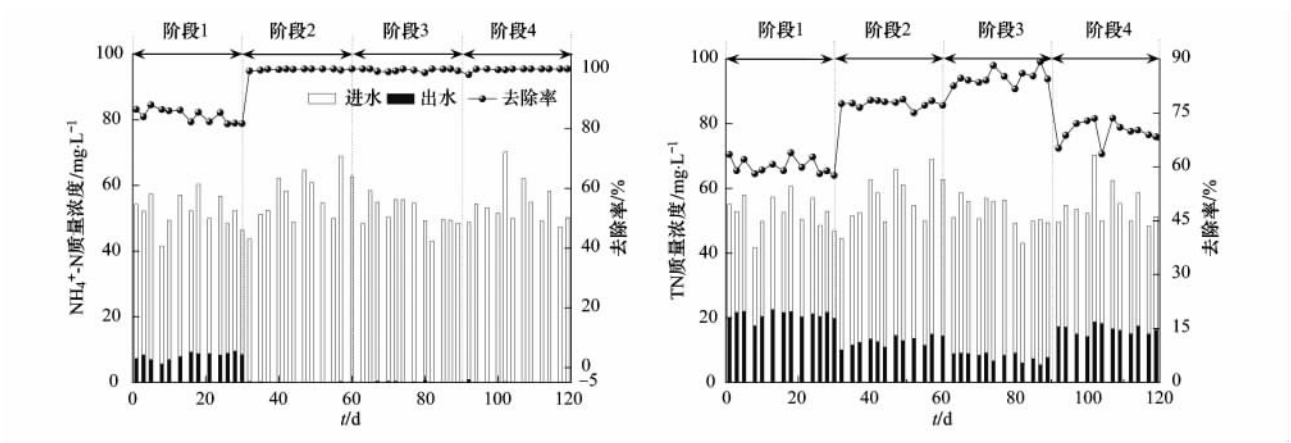


图3 4种进水流量分配比下的氮元素的变化趋势

Fig.3 Variation profiles of nitrogen with four influent distribution ratios

除. 最佳进水流量分配比的选择需要考虑工艺结构设置、污水水质和微生物种群类型等因素,在试验基础上综合分析得到.

传统的 A/O、A<sup>2</sup>/O 等工艺脱氮主要通过硝化反硝化过程和微生物细胞同化作用. 本试验结果表明,除上述脱氮途径外系统好氧区存在明显的总氮损失现象(表1),氨氮的氧化量远远大于氧化态氮的生成量(表1中ΔN损失量),而且好氧区不同格室的碱度减少量小于氨氮氧化过程所需的碱度,从两方面分析均证明好氧区发生了同步硝化反硝化现象.

另外,根据公式(1)~(4)计算了4种进水流量分配条件下的氮元素的物料平衡,如表2所示. 尽管缺氧反硝化脱氮过程仍然是主要的脱氮途径,但是好氧区的 SND 对总氮的去除贡献却不容忽视,4种条件下分别为1.5、8.65、18.6和8.74 g/d. 而且,当流量分配为40%:30%:30%时,系统 SND 率高达32.8%,同时总氮去除率为88.2%,可见同步硝化反硝化现象在一定程度上有利于提高总氮的去除. 对于系统发生 SND 现象的原因进行了以下2点的分析:①反应器保持较高的污泥浓度,沿推流方向三

表1 进水流量分配比对工艺性能的影响

| Table 1 Effect of inflow distribution ratios on the modified step feed process performance |                                  |       |       |       |       |       |       |           |       |       |           |       |       |      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-------|------|
| 进水流量分<br>配比/%                                                                              | 参数<br>/mg·L <sup>-1</sup>        | 原水    | 第 1 段 |       |       |       | 第 2 段 |           |       |       | 第 3 段     |       |       | 出水   |
|                                                                                            |                                  |       | 厌氧    | 缺氧池 1 |       | 好氧池 1 |       | 缺氧<br>池 2 | 好氧池 2 |       | 缺氧<br>池 3 | 好氧池 2 |       |      |
|                                                                                            |                                  |       |       | 数值    | ΔP 损失 | 数值    | ΔN 损失 |           | 数值    | ΔN 损失 |           | 数值    | ΔN 损失 |      |
| 20:30:50                                                                                   | COD                              | 269.7 | 86.5  | 61.5  |       | 38.2  |       | 59.9      | 40.8  |       | 62.9      | 49.0  | 48.9  |      |
|                                                                                            | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N  | 56.7  | 14.7  | 7.89  |       | 0.21  |       | 19.0      | 0.72  |       | 20.4      | 8.43  | 8.31  |      |
|                                                                                            | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N  | 0.22  | 1.05  | 4.03  |       | 8.03  | 4.39  | 3.78      | 11.6  | 10.5  | 7.43      | 13.1  | 6.38  | 12.9 |
|                                                                                            | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N  | 0.02  | 0.02  | 0.33  |       | 0.03  |       | 0.00      | 0.00  |       | 0.08      | 0.004 | 0.01  |      |
|                                                                                            | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P | 12.4  | 11.8  | 0.60  | 3.66  |       | 4.81  | 2.93      |       | 3.21  | 2.44      |       | 2.47  |      |
| 30:40:30                                                                                   | COD                              | 289.5 | 105.3 | 47.8  |       | 40.3  |       | 65.4      | 39.4  |       | 53.2      | 49.4  | 47.8  |      |
|                                                                                            | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N  | 49.9  | 19.3  | 12.8  |       | 0.41  |       | 21.3      | 0.75  |       | 13.6      | 0.00  | 0.00  |      |
|                                                                                            | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N  | 0.01  | 0.87  | 3.99  |       | 9.68  | 2.95  | 2.64      | 11.3  | 11.91 | 2.44      | 10.5  | 5.59  | 10.2 |
|                                                                                            | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N  | 0.00  | 0.01  | 0.44  |       | 0.05  |       | 0.03      | 0.01  |       | 0.06      | 0.01  | 0.00  |      |
|                                                                                            | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P | 6.36  | 21.05 | 14.0  | 7.05  | 1.27  |       | 1.84      | 0.95  |       | 1.02      | 1.08  | 1.11  |      |
| 40:30:30                                                                                   | COD                              | 289.0 | 128.8 | 49.7  |       | 44.3  |       | 60.4      | 41.9  |       | 51.1      | 40.1  | 32.7  |      |
|                                                                                            | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N  | 55.6  | 26.8  | 19.5  |       | 0.61  |       | 18.6      | 0.92  |       | 13.1      | 0.00  | 0.00  |      |
|                                                                                            | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N  | 0.18  | 0.13  | 1.29  |       | 6.01  | 5.64  | 1.37      | 8.58  | 10.74 | 1.56      | 6.68  | 8.16  | 6.53 |
|                                                                                            | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N  | 0.03  | 0.03  | 0.53  |       | 0.08  |       | 0.27      | 0.00  |       | 0.27      | 0.09  | 0.08  |      |
|                                                                                            | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P | 5.98  | 29.7  | 9.36  | 20.3  | 0.33  |       | 0.52      | 0.38  |       | 0.52      | 0.41  | 0.42  |      |
| 50:30:20                                                                                   | COD                              | 287.6 | 156.7 | 65.7  |       | 43.3  |       | 62.8      | 48.3  |       | 48.9      | 47.9  | 47.2  |      |
|                                                                                            | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N  | 54.39 | 30.9  | 22.6  |       | 4.52  |       | 23.3      | 2.03  |       | 9.43      | 0.01  | 0.00  |      |
|                                                                                            | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N  | 0.14  | 0.99  | 6.75  |       | 17.6  | 7.81  | 9.32      | 15.8  | 15.8  | 9.55      | 16.0  | 2.96  | 15.7 |
|                                                                                            | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N  | 0.31  | 0.02  | 0.61  |       | 0.03  |       | 1.26      | 0.25  |       | 0.39      | 0.40  | 0.35  |      |
|                                                                                            | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P | 5.58  | 31.2  | 11.2  | 20.0  | 0.21  |       | 0.51      | 0.04  |       | 0.31      | 0.08  | 0.09  |      |

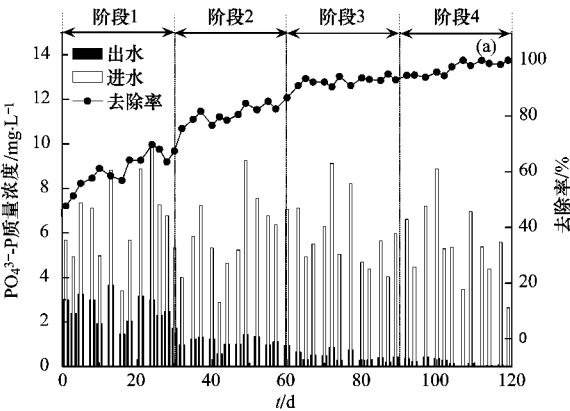
表 2 改良 UCT 分段进水工艺系统氮平衡分析

Table 2 Nitrogen balance analyses of the modified

| 项目                                                      | UCT step feed process |          |          |          |
|---------------------------------------------------------|-----------------------|----------|----------|----------|
|                                                         | 进水流量比/%               |          |          |          |
|                                                         | 20:30:50              | 30:40:30 | 40:30:30 | 50:30:20 |
| $N_{in\text{fluent}}/\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$        | 57.8                  | 50.8     | 56.7     | 56.0     |
| $N_{\text{waste}}/\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$           | 14.0                  | 9.49     | 12.7     | 11.7     |
| $N_{\text{denitrification}}/\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ | 18.8                  | 44.8     | 33.4     | 34.9     |
| $N_{\text{effluent}}/\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$        | 21.6                  | 10.4     | 6.74     | 16.4     |
| $N_{\text{SND}}/\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$             | 11.5                  | 8.65     | 18.6     | 8.74     |
| SND /%                                                  | 20.0                  | 17.0     | 32.8     | 15.6     |
| TN 去除率/%                                                | 62.7                  | 79.6     | 88.2     | 71.0     |

段 MLVSS 分别为5 500、4 750和4 100 mg/L,另外,反应器格式呈方形,曝气头设置在格式中间[ DO 为 (1.5~2.0) mg/L],导致格式四周溶解氧浓度较低 [(0.05~0.8) mg/L],形成局部的溶解氧浓度梯度排列的宏观环境;②好氧反硝化菌的存在可以提高 SND 现象的发生<sup>[15]</sup>.

2.3 系统磷的去除机制探讨



尽管系统进水磷浓度和负荷基本稳定,维持在 6.0 mg/L和 0.018 kg/(m<sup>3</sup>·d) 左右,但是不同流量分配比条件的释磷量[图 4(b)],吸磷特性[图 4(b)]和去除率[图 4(a)]表现出明显的不同.随着进水流量分配比的不断变化,出水磷浓度逐渐下降,磷去除率增加.阶段 1,平均出水磷 2.44 mg/L,去除率仅为 60.5%,结合沿程 COD 的数据分析(表 1),厌氧区 COD 仅为 86.5 mg/L,不能为聚磷菌提供充足的有机碳源,影响释磷性能,导致后续好氧吸磷.提高首段进水流量比例,厌氧区有机物 COD 增加至 105.3 mg/L(阶段 2)和 128.8 mg/L(阶段 3),相应的释磷量为 21.05 mg/L和 29.7 mg/L,去除率为 83.1%和 93.1%.阶段 4 磷去除率增加到 97.2%,但该条件下系统氮去除性能有恶化趋势.综合考虑氮磷,当进水流量分配比为 40%:30%:30% 时,可以在保证脱氮性能的基础上,提高聚磷菌的活性和释磷/吸磷能力,改善系统磷的去除能力.

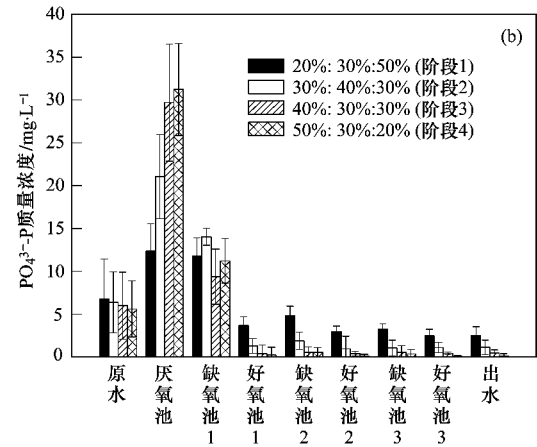


图 4 4 种进水流量分配比下的磷元素的去除效果和沿程变化

Fig. 4 Variation profiles of phosphorus with four influent distribution ratios

另外,分析系统磷的沿程转化特性[图 4(b)]可以看出,阶段 1 和阶段 2 厌氧池释磷量较少,且随后的缺氧池 1 磷浓度变化不大,而阶段 3 和阶段 4 条件下,缺氧池 1 磷浓度下降趋势较明显,也就是说,缺氧区同时发生了反硝化和吸磷过程.为了证实反硝化除磷菌的存在,按照 Wachtmeister 等<sup>[16]</sup>的方法,在不同试验阶段测定了反硝化聚磷菌(DNPAOs)占聚磷菌微生物的比例关系,以把握系统反硝化聚磷菌的演变富集过程.结果显示,阶段 3 和 4 时系统中约有 32.6%~39.5% 的 DNPAOs.阶段 3 和阶段 4 的厌氧区为聚磷菌释磷和合成内碳源提供足够的可降解有机物,有利于后续的缺氧区反

硝化除磷的发生<sup>[17]</sup>.该工艺首段的缺氧反硝化除磷和后续好氧吸磷过程,使得出水磷浓度满足排放标准. Ma 等<sup>[18]</sup>采用 A<sup>2</sup>/O 分段进水工艺处理实际生活污水,通过强化系统反硝化除磷性能实现出水中仅含 0.3 mg/L 的磷. Østgaard 等<sup>[19]</sup>论证了实际污水处理厂运行过程中,反硝化除磷现象对 UCT 系统除磷性能的重要性.

2.4 营养元素比对工艺脱氮除磷性能的影响

原水 COD/TN 的高低直接关系到系统脱氮能力的大小[图 5(b)],当 COD/TN 为 7.41 时,TN 去除率高达 89.2%. COD/TN 越高,缺氧区的 COD/NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 越高,同等缺氧区水力停留时间内反硝化速

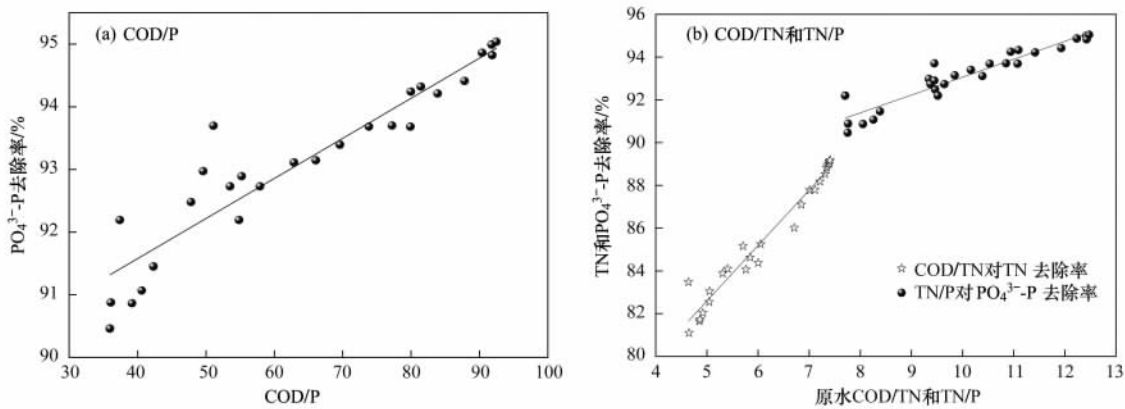


图5 原水营养元素比(COD/TN、COD/P和N/P)对氮磷去除的影响

Fig.5 Influences of influent COD/P, COD/TN and TN/P on TN and  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  removal

率得以提高,从而系统TN去除能力增加.

试验采用的北京某污水处理厂实际污水COD/P > 35.0,因而系统保持稳定高效的磷去除率(> 90%).如图5(a)所示,磷去除率随原水COD/P增加而提高,呈现较好的正比例相关性( $R^2 = 0.87$ ).但是,对于存在DNPAOs的反硝化除磷系统,原水TN/P对磷去除性能的影响作用不容忽视. Larrea等<sup>[7]</sup>研究指出,通过调整污泥回流比控制缺氧区出水硝酸盐或亚硝酸盐浓度为2.0 mg/L,能够有效地保证缺氧区反硝化除磷所需的电子供体量.本试验结果表明系统除磷能力与原水TN/P具有良好的正相关性[图5(b)],这也再次证明系统存在并发生了反硝化除磷现象.

2.5 污泥沉降性分析

合理设置厌氧生物选择池可改善工艺除磷性能,提高活性污泥的沉降性<sup>[2]</sup>.改良UCT分段进水工艺交替的缺氧进水和好氧曝气运行方式,使整个工艺流程在时间和空间上形成类似“生物选择器”的作用,有机物浓度发生周期性的变化,池体的微生物生长环境不断改变,丝状菌始终保持较低的生长效率,因而系统始终保持较低的SVI值,4个阶段下的平均值为(82.6 ± 4.99) mL/g(图6),可以有效地控制丝状菌污泥膨胀.

基于以上分析可知,改良UCT分段进水工艺在生物污水处理脱氮除磷效率方面具有明显的竞争优势,尤其是针对低COD/N生活污水,主要包括:①在最佳进水流量分配比条件下工艺可以合理充分利用原水碳源,实现同步高效脱氮除磷;②通过厌氧区的生物选择作用,以及交替的缺氧好氧运行方式,一定程度上抑制丝状菌生长,防止污泥膨胀;③无需硝

化液内回流设施,好氧区DO浓度低,运行费用少;④反应器平均污泥浓度高,同样处理条件下曝气池所需容积小;⑤系统安全性高.在反应器前几段不能完全去除的污染物,能够在后续格室继续反应<sup>[2,5-7,14,20,21]</sup>.另外,适用于已建污水厂的升级改造工程.

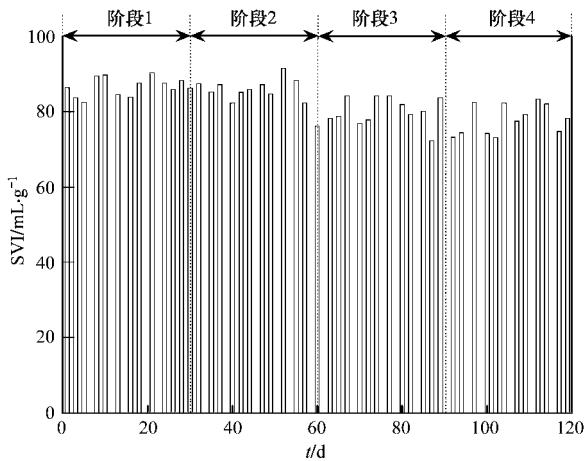


图6 4种进水流量分配比下的系统SVI变化趋势

Fig.6 Variation profiles of SVI with four influent distribution ratios

4 结论

- (1) 本试验条件下,进水流量分配比为40%:30%:30%时,改良UCT分段进水工艺实现同步深度去除有机物和氮磷营养元素,COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN和磷出水水质达到国家城镇污水一级A排放标准.
- (2) 合适的进水流量分配比使得60.2% ~ 76.2%的COD在各段厌氧区和缺氧区,通过释磷和反硝化过程被去除,充分利用原水有机物,对于处理

低 COD/N 生活污水具有重要意义.

(3)交替的缺氧/好氧运行方式和进水流量的合理分配对于硝化反应的顺利进行和总氮高效去除有着重要的作用,另外加之 32.8% 的 SND 率的作用,使得系统实现深度脱氮.

(4)保证首段进水碳源的条件下,强化首段缺氧区的反硝化除磷是提高系统除磷效率的有效途径. 进水流量分配比为 50% : 30% : 20% 条件下,反硝化聚磷菌约占聚磷菌的 32.6% ~ 39.5% ,磷去除率提高至 97.2% .

参考文献:

[ 1 ] Zhu G B, Peng Y Z, Li B K, *et al.* Biological removal of nitrogen from wastewater [ J ]. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, 2008, **192**(4):159-195.

[ 2 ] Maccalf E, Eddy H. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse[M]. New York: McGraw Hill,2003.

[ 3 ] Baeza J A, Gabriel D, Lafuente J. Improving the nitrogen removal efficiency of an A<sup>2</sup>/O based WWTP by using an on-line Knowledge Based Expert System[J]. Water Research, 2002, **36** (8):2109-2123.

[ 4 ] 王伟,孙亚男,彭永臻. 分段进水 A/O 工艺外碳源投加控制策略的比较研究[J]. 环境科学,2009,**30**(3):792-797.

[ 5 ] Katser R, Stobbe G, Werner M. Operational results of the Wolfsburg wastewater treatment plant [ J ]. Water Science and Technology, 1992, **25**(6):203-209.

[ 6 ] Pai T Y, Tsai Y P, Chou Y J, *et al.* Microbial kinetic analysis of three different types of EBNR process[J]. Chemosphere, 2004, **55**(1):109-118.

[ 7 ] 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 ]. Water Science and Technology, 2001, **43**(1):261-268.

[ 8 ] Zhu G B, Peng Y Z, Ma B, *et al.* Optimization of anoxic/oxic step feeding activated sludge process with fuzzy control model for improving nitrogen removal[J]. Chemical Engineering Journal, 2009, **151**:195-201.

[ 9 ] 葛士建,彭永臻,张亮,等. 改良 UCT 分段进水脱氮除磷工艺性能及物料平衡[J]. 化工学报, 2010,**61**(4):1009-1017.

[10] APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater[M]. (20th ed). Washington DC:1998.

[11] Henze M, Gujer W, Mino T, *et al.* Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3 Scientific and Technical Report[R]. London; 2001, No. 9.

[12] Zhu G B, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Effect of influent flow rate distribution on the performance of step-feed biological nitrogen removal process [ J ]. Chemical Engineering Journal, 2007, **131**(1-3):319-328.

[13] Funamizu N, Yamamoto S, Kitagawa Y, *et al.* Simulation of the operational conditions of the full-scale municipal wastewater treatment plant to improve the performance of nutrient removal [ J ]. Water Science and Technology, 1997, **36**(12):9-18.

[14] Vaiopoulou E, Aivasidis A. A modified UCT method for biological nutrient removal: Configuration and performance[J]. Chemosphere, 2008, **72**(7):1062-1068.

[15] Joo H S, Hirai M, Shoda M. Piggery wastewater treatment using *Alcaligenes faecalis* strain No. 4 with heterotrophic nitrification and aerobic denitrification[J]. Water Research, 2006, **40**(16):3029-3036.

[16] Wachtmeister A, Kuba T, Van Loosdrecht M C M, *et al.* A sludge characterization assay for aerobic and denitrifying phosphorus removing sludge [ J ]. Water Research, 1997, **31** (3):471-478.

[17] Kapagiannidis A G, Zafiriadis I, Aivasidis A. Comparison between UCT type and DPAO biomass phosphorus removal efficiency under aerobic and anoxic conditions [ J ]. Water Science and Technology, 2009, **60**(10):2695-2703.

[18] Ma Y, Peng Y Z, Wang X L. Improving nutrient removal of the AAO process by an influent bypass flow by denitrifying phosphorus removal [ J ]. Desalination, 2009, **246** (1-3):534-544.

[19] Østgaard K, Christensson M, Lie E, *et al.* Anoxic biological phosphorus removal in a full-scale UCT process [ J ]. Water Research, 1997, **31**(11):2719-2726.

[20] Chang H Y, Ouyang C F. Improvement of nitrogen and phosphorus removal in the anaerobic-oxic-anoxic-oxic ( AOA ) process by stepwise feeding[J]. Water Science and Technology, 2000, **42**(3-4):89-94.

[21] 王伟,王淑莹,孙亚男,等. 流量分配对分段进水 A/O 工艺脱氮性能的影响[J]. 环境科学,2009,**30**(1):96-101.