

## 厌氧环境对 UNITANK 工艺性能的影响

董姗姗<sup>1,2</sup>, 陈刚<sup>1</sup>, 池春榕<sup>1</sup>, 刘祖文<sup>1,2</sup>, 陈奇春<sup>3</sup>, 万励谦<sup>3</sup>

(1. 江西理工大学 建筑与测绘工程学院, 江西 赣州 341000; 2. 江西理工大学 赣江流域水质安全保障工程技术研究中心, 江西 赣州 341000; 3. 江西洪城水业环保有限公司, 江西 南昌 330000)

**摘要:** 以赣南地区低碳源实际城市污水为研究对象, 分析了 UNITANK 工艺中边池厌氧时间对系统脱氮除磷性能的影响。结果表明, 当内回流比为 100% 时, 随着边池厌氧时间的增加, TN 去除率呈现先增加后减小的趋势, 而 TP 去除率则逐渐增大; 边池厌氧时间对 COD、NH<sub>3</sub>-N 的去除效果影响较小。当厌氧时间为 60 min 时, 出水 COD、NH<sub>3</sub>-N、TN、TP 的平均浓度分别为 11.07、0.93、11.78、0.85 mg/L, 除 TP 外其他 3 项指标均优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 的一级 A 标准要求; 通过考察试验装置边池半周期内各组分浓度的动态变化, 在边池厌氧时间为 100 min 的条件下, 厌氧释磷现象最为明显, 边池 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 积累浓度最高, 边池存在反硝化过程和释磷过程对碳源的竞争问题。

**关键词:** UNITANK 工艺; 厌氧时间; 脱氮除磷; 城市污水

**中图分类号:** TU992.3 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)21-0074-06

## Effect of Anaerobic Environment on Performance of UNITANK Process

DONG Shan-yan<sup>1,2</sup>, CHEN Gang<sup>1</sup>, CHI Chun-rong<sup>1</sup>, LIU Zu-wen<sup>1,2</sup>, CHEN Qi-chun<sup>3</sup>,  
WAN Li-qian<sup>3</sup>

(1. School of Architectural and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; 2. Research Center for Water Quality Security Technology at Ganjiang River Basin, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; 3. Environmental Protection Co. Ltd. Jiangxi Seong Water Industry, Nanchang 330000, China)

**Abstract:** The effect of the anaerobic time in the side tank on the efficiency of nitrogen and phosphorus removal of the UNITANK process was investigated based on the actual municipal sewage from the south Jiangxi area. The results showed that when the internal reflux ratio was 100%, with the increase of the anaerobic time in the side tank, the removal rate of TN was firstly increased and then decreased, while the removal rate of TP increased gradually. The anaerobic time in the side tank had negligible effect on the removal efficiency of COD and NH<sub>3</sub>-N. When the anaerobic time was 60 min, the average concentrations of effluent COD, NH<sub>3</sub>-N, TN and TP were 11.07 mg/L, 0.93 mg/L, 11.78 mg/L and 0.85 mg/L, respectively. All indicators except TP had satisfied the first level A standard in the *Discharge Standards of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002). The dy-

namic changes of the component concentrations in the half cycle of the side tank were investigated. When the anaerobic time in the side tank was 100 min, the anaerobic phosphorus release was obvious, and the concentration of  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  in the side tank was at the highest level. The processes of denitrification and phosphorus release in the side tank competed for the carbon source.

**Key words:** UNITANK process; anaerobic time; nitrogen and phosphorus removal; municipal sewage

UNITANK 工艺将传统活性污泥法的污水空间推流与 SBR 工艺的时间推流相结合,使得反应器进水与出水在流动方向上具有周期性性与交替式的特点。该工艺通过灵活的空间及时间控制可以达到一定的脱氮除磷目的。然而,UNITANK 工艺在处理实际污水过程中也有一些缺点,如容积利用率较低、除磷效果不理想、自动化程度要求高等<sup>[1,2]</sup>。

为了提高 UNITANK 工艺的除污性能,众多学者对强化 UNITANK 系统性能进行了深入研究。雷明等<sup>[3]</sup>的研究表明,在厌氧搅拌时间为 60 min、进水 TP 浓度为 2.21 ~ 5.02 mg/L 条件下,出水 TP 浓度为 0.31 ~ 0.89 mg/L,TP 平均去除率为 65% ~ 91%。陈婉如等<sup>[4]</sup>发现,当边池和中池进水时间由原来的 1.66 : 1 调整为 1.1 : 1 后,平均出水氨氮浓度由原来的 5.83 mg/L 降低至 4.0 mg/L,对氨氮的平均去除率提高了 9%。罗隽等<sup>[1,5]</sup>从评估南方某污水厂污泥性状等方面入手,通过投加营养盐、间歇曝气、排放剩余污泥等方式提高了污水处理效果。然而,在低碳源水质条件下,厌氧时间对 UNITANK 工艺性能的影响却鲜有报道。

笔者通过构建 UNITANK 小试装置,利用实际污水,考察了厌氧时间对 UNITANK 工艺脱氮除磷性能的影响,旨在为实际污水厂 UNITANK 工艺优化、提标改造提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置

UNITANK 装置主要由反应池、水系统(包括蠕

动泵、进出水及排泥管路等)、曝气系统(包括空压机、曝气石等)、搅拌系统(包括 3 台搅拌器)和 PLC 控制系统(包括 PLC 控制器及相关线路)组成,见图 1。装置所用阀门均为电磁阀,由 PLC 控制器单独控制。反应池由有机玻璃制作而成,由 3 个矩形反应池(A 池、B 池和 C 池)组成,其大小相同。反应池的长×宽×高为 0.9 m×0.3 m×0.6 m,总有效容积为 150 L,处理水量为 0.2 m<sup>3</sup>/d,设计 HRT 为 18 h。各反应池底部连通,边池上部设有进出水口,底部设有排泥口。

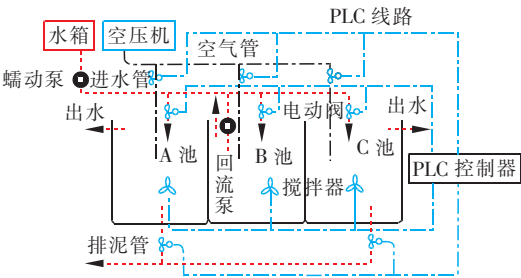


图 1 UNITANK 装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of UNITANK

1.2 试验过程

UNITANK 工艺运行周期为 6 h,上半周期(0 ~ 3 h)从 A 池进水、C 池出水,下半周期(3 ~ 6 h)从 C 池进水、A 池出水。周期设置边池厌氧时间分别为 40、60、80、100 min,过渡时间为 30 min,具体运行方式见表 1。同时,在边池搅拌阶段,通过蠕动泵将中池混合液回流至边池,控制回流比  $R$ (即中池回流混合液流量与进水流量的比值)为 100%。

表 1 UNITANK 装置的运行矩阵

Tab. 1 Running matrix of UNITANK

运行工况/min				各池运行状态			进出水状态
工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	A 池	B 池	C 池	
0 ~ 40	0 ~ 60	0 ~ 80	0 ~ 100	搅拌	曝气	沉淀	A 进 C 出
40 ~ 120	60 ~ 120	80 ~ 120	100 ~ 120	曝气	曝气	沉淀	A 进 C 出
120 ~ 150	120 ~ 150	120 ~ 150	120 ~ 150	曝气	曝气	沉淀	B 进 C 出
150 ~ 180	150 ~ 180	150 ~ 180	150 ~ 180	沉淀	曝气	沉淀	B 进 C 出
180 ~ 220	180 ~ 240	180 ~ 260	180 ~ 280	沉淀	曝气	搅拌	C 进 A 出

续表1 (Continued)

运行工况/min				各池运行状态			进出水状态
工况1	工况2	工况3	工况4	A池	B池	C池	
220~300	240~300	260~300	280~300	沉淀	曝气	曝气	C进A出
300~330	300~330	300~330	300~330	沉淀	曝气	曝气	B进A出
330~360	330~360	330~360	330~360	沉淀	曝气	沉淀	B进A出

### 1.3 试验水质及接种污泥

UNITANK装置放于赣州市某污水处理厂提升泵房内,反应池水温为16~23℃。试验用水取自该污水处理厂沉砂池进水,通过水泵引至水箱,再利用蠕动泵精确控制进水量。进水水质:COD为59.14~247.9 mg/L,平均浓度为106.01 mg/L;NH<sub>3</sub>-N为9.51~33.4 mg/L,平均浓度为16.58 mg/L;TN为14.21~34.80 mg/L,平均浓度为21.67 mg/L;TP为0.74~4.03 mg/L,平均浓度为1.74 mg/L;pH值为7.1~7.5,平均为7.4。接种污泥取自该污水处理厂污泥浓缩池,污泥浓缩池内为待压缩污泥,活性良好。接种后经过一段时间驯化,反应池内污泥浓度保持在2 000~3 000 mg/L,污泥性能稳定,出水水质良好。

### 1.4 分析项目与测定方法

UNITANK装置运行期间,相关水质指标均按照《水和废水监测分析方法》(第4版)进行检测。

## 2 结果与讨论

### 2.1 UNITANK对主要污染物的去除效果

#### 2.1.1 对COD的去除效果

UNITANK装置对COD的去除效果表明,进水COD浓度变化较大,这是因为该地区进水COD较低,但受降雨及工业废水的冲击影响较大。装置运行期间,实际出水COD在7.09~29 mg/L之间,平均出水COD浓度均在18 mg/L以下,COD平均去除率为81.46%,表明厌氧时间对UNITANK工艺的COD去除效果影响不大,可见UNITANK工艺对低碳源污水具有较好的抗冲击能力。

#### 2.1.2 对NH<sub>3</sub>-N及TN的去除效果

装置运行期间,UNITANK工艺对NH<sub>3</sub>-N的去除效果表明,出水NH<sub>3</sub>-N在0.07~2.65 mg/L之间,对NH<sub>3</sub>-N的平均去除率为93.45%。由于边池厌氧搅拌后还有较长时间的曝气过程,且中池始终处于曝气状态,因此可以保证对氨氮的去除率,即边池厌氧时间的变化对NH<sub>3</sub>-N的去除效果影响不大。温度是影响硝化反应的重要因素,当水温在20℃以上时,硝化细菌活性较高,这与陶芳等<sup>[6]</sup>的研究结果一致。

究结果一致。

实际运行工况条件下,UNITANK装置对氮的去除效果如图2所示。

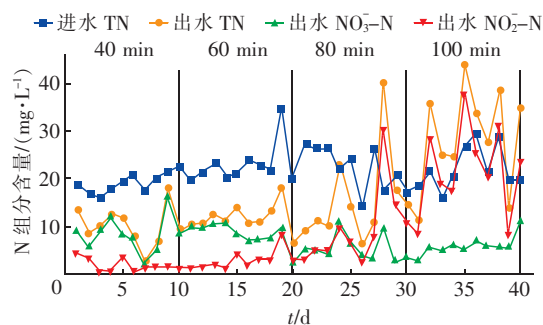


图2 UNITANK工艺对氮的去除效果

Fig.2 Removal effect of nitrogen by UNITANK

由图2可知,试验期间出水TN在2.91~44.18 mg/L之间。当厌氧时间为40 min时,UNITANK工艺对TN的平均去除率为46.79%;厌氧时间为60 min时,对TN的平均去除率为48.74%。可见,在一定范围内,增加UNITANK工艺边池厌氧搅拌时间,可以提高对TN的去除效果。上半周期末,边池处于沉淀阶段,中池曝气反应生成的大量NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N回流至边池,边池经半周期积累了大量的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N。边池在下半周期的搅拌状态下,反硝化细菌利用污水中的碳源进行反硝化反应。在厌氧时间为40 min的条件下,出水中NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的平均浓度分别为1.69、7.92 mg/L,当厌氧时间为60 min时,出水中NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的平均浓度分别为2.69和8.21 mg/L,可见出水NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N占的比例较大。当厌氧时间为80和100 min时,UNITANK工艺对TN的去除效果变差,出现出水TN高于进水TN的情况,可能是因为延长了厌氧搅拌时间,形成了有利于聚磷菌厌氧释磷的环境,这在一定程度上限制了反硝化细菌的反硝化作用。当厌氧时间为100 min时,平均出水NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N浓度达到了22.08 mg/L,而平均出水NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N浓度仅为5.63 mg/L,表现出NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N的积累。由于反硝化和除磷过程对碳源的竞争,延长厌氧时间,反硝化过程受到限制。

### 2.1.3 对 TP 的去除效果

图 3 为 UNITANK 装置对 TP 的去除效果。可以看出,出水 TP 为 0.04 ~ 1.43 mg/L。当厌氧时间分别为 40、60、80、100 min 时,UNITANK 工艺对 TP 的去除效果整体呈增强的趋势。当厌氧时间为 40、100 min 时,对 TP 的平均去除率分别为 55.75% 和 65.33%。这是由于延长厌氧搅拌时间可以为大分子有机物的降解提供充足的反应时间,同时在污水低碳源条件下,泥水充分接触有助于内碳源的利用<sup>[7]</sup>。根据运行矩阵的设定,边池运行特点与 A<sup>2</sup>O 工艺类似,表现为缺氧/厌氧/好氧的运行状态。当边池由上半周期转入下半周期后,边池内积累了大量的硝态氮,边池首先进行反硝化反应;随着溶解氧、硝态氮的消耗,边池逐渐转为厌氧状态,为聚磷菌厌氧释磷创造了有利条件。另外,一般认为亚硝态氮会对聚磷菌的活性产生抑制作用。综合本试验结果来看,NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 对 UNITANK 工艺去除 TP 的影响不大。

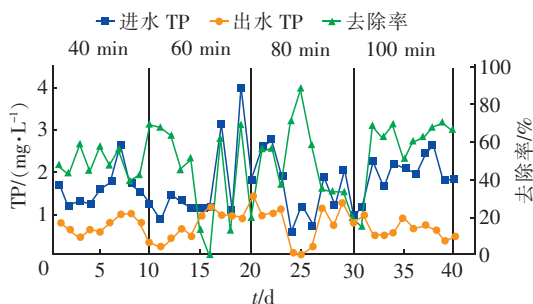


图 3 UNITANK 工艺对 TP 的去除效果

Fig. 3 Removal effect of TP by UNITANK

边池厌氧时间是 UNITANK 工艺运行的重要参数。厌氧时间过短可能导致厌氧释磷不充分,影响除磷效果;厌氧时间过长,边池曝气时间相对缩短,影响边池的硝化及反硝化过程,因此厌氧时间必须合理设置。考虑到赣南地区污水中碳源较低,存在反硝化和除磷过程对碳源的竞争,可以将边池厌氧时间设置为 60 ~ 80 min。

## 2.2 边池半周期内污染物的动态变化

边池搅拌时间内,反硝化过程及聚磷菌释磷过程都在此时间段内进行。分别在 40、60、80、100 min 厌氧时间下,系统稳定运行的后期阶段,考察边池半周期内 COD、N、P 组分浓度的动态变化。

### 2.2.1 COD 浓度的动态变化

COD 浓度的动态变化如图 4 所示。可以看出,

不同搅拌时间下,边池中 COD 浓度在 0 ~ 30 min 内呈现快速下降的趋势。一方面是因为活性污泥(菌胶团)对有机物的吸附作用;另一方面,边池在上半周期积累了大量的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N,反硝化细菌可以利用污水中的碳源进行反硝化反应。当厌氧时间为 100 min 时,边池 COD 浓度在 30 min 内下降了 123.22 mg/L,边池经曝气反应后,COD 浓度稳定在 20 ~ 30 mg/L,此阶段主要发生有机质的好氧降解。可见,UNITANK 工艺对进水 COD 具有良好的去除效果,边池厌氧时间的变化对 COD 的去除效果影响不大。

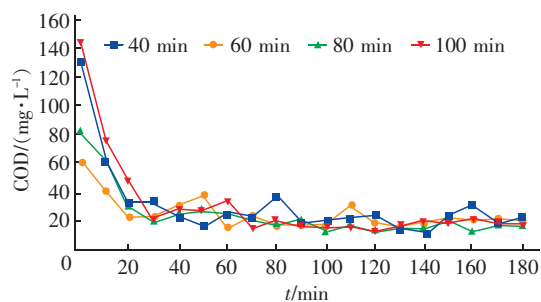


图 4 COD 的动态变化

Fig. 4 Dynamic change of COD

### 2.2.2 N 组分的动态变化

试验结果表明,边池 NH<sub>3</sub>-N 浓度在搅拌过程中均呈上升趋势。当边池厌氧时间为 80 min 时,氨氮浓度由初始的 2.59 mg/L 升高到 5.02 mg/L。搅拌过程中,边池处于缺氧或厌氧状态,进水中氨氮浓度在边池逐渐积累。当边池开启曝气程序之后,NH<sub>3</sub>-N 浓度逐渐降低。此时,氨化细菌及硝化细菌开始发挥作用,最终将 NH<sub>3</sub>-N 转化为 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N。可见,厌氧时间对 UNITANK 工艺去除氨氮的效果影响不大。

NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度的动态变化如图 5 所示。可以看出,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的降解可以分为三个阶段,以 40 min 的搅拌时间为例,第一阶段(0 ~ 40 min),边池经上半周期积累了大量的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N,经过搅拌作用,使活性污泥与污水充分混合,边池内发生了反硝化反应,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度从 14.75 mg/L 下降至 9.12 mg/L。第二阶段(40 ~ 150 min),边池从搅拌状态转为曝气状态,边池内发生 COD 降解和硝化反应,氨氮被转化为 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度从 9.12 mg/L 上升至 15.43 mg/L。第三阶段(150 ~ 180 min),边池由曝气状态转变为沉淀状态。第三阶段也发生了反硝化作用,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度从 12.21 mg/L 下降至 11.34



mg/L。边池由曝气状态转为沉淀状态之后,与二沉池类似,此阶段主要是为边池下半周期作为沉淀池提供缓冲作用。王社平等<sup>[8]</sup>发现,二沉池回流污泥中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度为 5 ~ 10 mg/L,远低于二沉池内  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度(5 ~ 32 mg/L),说明污泥在沉淀过程中也会发生反硝化反应。

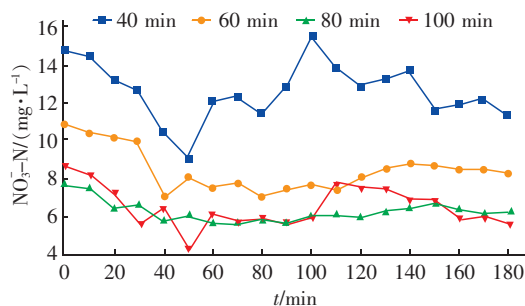


图5  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度的动态变化

Fig. 5 Dynamic change of  $\text{NO}_3^- - \text{N}$

$\text{NO}_2^- - \text{N}$  浓度的动态变化如图6所示。可知,当厌氧时间为40、60 min时,系统内积累的亚硝态氮浓度较低,基本都在3 mg/L以下,且半周期内并无明显变化;当厌氧时间为80、100 min时,系统内积累了大量的  $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 。边池搅拌过程中,亚硝态氮呈升高趋势。当厌氧时间为100 min时,  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  浓度从9.43 mg/L上升至19.23 mg/L。这与葛勇涛等<sup>[9]</sup>的研究结果一致,即当碳源不足时,会使  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  转化为  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  的反应速率高于  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  转化为  $\text{N}_2$  的反应速率,这时就会出现  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  的积累。本试验装置边池再曝气后,  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  浓度明显下降,最终下降至8.98 mg/L,此阶段主要是曝气作用使部分  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  转化为  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 。

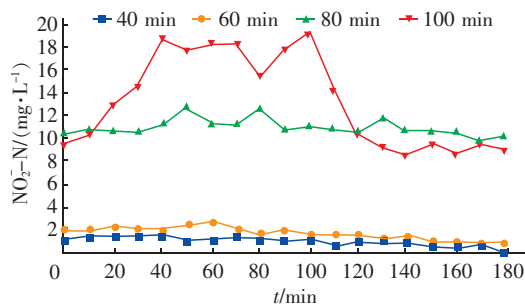


图6  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  浓度的动态变化

Fig. 6 Dynamic change of  $\text{NO}_2^- - \text{N}$

### 2.2.3 TP 浓度的动态变化

TP 浓度的动态变化如图7所示。可以看出,当厌氧时间为40和60 min时,边池并未出现明显的

释磷现象。这可能是由于搅拌时间过短,未形成有利于聚磷菌厌氧释磷的环境。徐建宇等<sup>[10]</sup>认为,厌氧时间不宜过长或过短,如果厌氧时间太短,既不能保证磷的有效释放,也不能保证污泥中兼性酸化菌充分地污水中的大分子有机物分解为低级脂肪酸,以供聚磷菌摄取,并且也影响磷的释放。当厌氧时间为100 min时,出现明显的释磷及吸磷过程。边池搅拌过程中,TP 浓度从2.10 mg/L上升至2.72 mg/L;边池曝气后,TP 浓度明显下降,最终降低至0.86 mg/L。

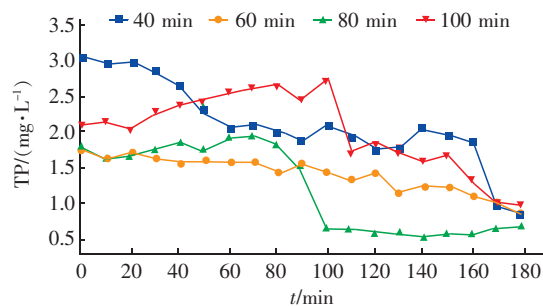


图7 TP 浓度的动态变化

Fig. 7 Dynamic change of TP

## 3 结论

① UNITANK 工艺的边池厌氧时间对 COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$  的去除效果影响较小,整个试验过程中,平均出水 COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$  浓度分别为 17.31 和 1.01 mg/L,均优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准要求。厌氧时间显著影响 UNITANK 工艺去除 TN 和 TP 的效果,随着厌氧时间的增加,TN 去除率呈现先增加后减小的趋势,而 TP 去除率则逐渐增强。当厌氧时间为60 min时,对 TN 的平均去除率为48.74%,平均出水 TN 浓度为11.78 mg/L;当厌氧时间为100 min时,对 TP 的平均去除率高达65.33%,平均出水 TP 为0.65 mg/L。

② 当厌氧时间分别为40、60、80和100 min时,边池半周期内,混合液中 COD 浓度先下降后趋于平稳, $\text{NH}_3 - \text{N}$  浓度先升高后降低。随着边池厌氧时间的增加,系统内  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  积累量逐渐增大,边池厌氧释磷现象逐渐增强。在边池厌氧时间为100 min条件下,  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  积累的最高浓度为19.23 mg/L,反硝化作用较差,边池搅拌过程中 TP 浓度从2.10 mg/L升高至2.72 mg/L。

③ 由于赣南地区的污水碳源较低,存在反硝

化过程和除磷过程对碳源的竞争,建议将内回流比设置为 100%,边池厌氧时间设置为 60~80 min。

#### 参考文献:

- [1] 罗隽,周秀秀,林方敏,等. 南方某污水厂 UNITANK 工艺的活性污泥性状评估[J]. 中国给水排水,2016,32(1):31-34.
- Luo Jun, Zhou Xiuxiu, Lin Fangmin, *et al.* Evaluation of characteristics of activated sludge in UNITANK process in a WWTP in South China [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(1): 31-34 (in Chinese).
- [2] 廖振良,朱柏荣,叶建锋. UNITANK 工艺机理及其研究进展[J]. 水处理技术,2009,35(1):20-23.
- Liao Zhenliang, Zhu Bairong, Ye Jianfeng. Progress of UNITANK process and mechanism [J]. Technology of Water Treatment, 2009, 35(1): 20-23 (in Chinese).
- [3] 雷明,张勇,徐廷国,等. UNITANK 工艺强化生物除磷运行矩阵的确定[J]. 工业水处理,2011,31(9):41-43.
- Lei Ming, Zhang Yong, Xu Tingguo, *et al.* Study on the running matrix of enhanced biological dephosphorization by UNITANK process [J]. Industrial Water Treatment, 2011, 31(9): 41-43 (in Chinese).
- [4] 陈婉如,张勇,崔松阳. 提高 UNITANK 工艺去除氨氮效能的研究[J]. 中国给水排水,2011,27(11):84-87.
- Chen Wanru, Zhang Yong, Cui Songyang. Measures for improving ammonia nitrogen removal efficiency by UNITANK process [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(11): 84-87 (in Chinese).
- [5] 罗隽,周秀秀,刘畅,等. 南方某 UNITANK 工艺污水处理厂活性污泥性状改善[J]. 中国给水排水,2016,32(16):119-122.
- Luo Jun, Zhou Xiuxiu, Liu Chang, *et al.* Improvement of activated sludge performance in a wastewater treatment plant with UNITANK process in South China [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(16): 119-122 (in Chinese).
- [6] 陶芳,黄燕,高尚,等. PCR-DGGE 法分析温度对 A<sup>2</sup>/O 系统硝化菌群结构的影响[J]. 华东师范大学学报:自然科学版,2009,(5):53-62.
- Tao Fang, Huang Yan, Gao Shang, *et al.* Application of PCR-DGGE to analyze the effect of temperature on structure of nitrifying bacteria in A<sup>2</sup>/O system [J]. Journal of East China Normal University: Natural Science, 2009, (5): 53-62 (in Chinese).
- [7] 赵梦月,王博,郭媛媛,等. 部分短程硝化 SBR 实现低 C/N 比生活污水碳源的充分利用[J]. 化工学报,2016,67(11):4825-4836.
- Zhao Mengyue, Wang Bo, Guo Yuanyuan, *et al.* Efficient organics utilization of low C/N ratio domestic sewage through partial nitritation SBR [J]. CIESC Journal, 2016, 67(11): 4825-4836 (in Chinese).
- [8] 王社平,邵军峰,万琼,等. A<sup>2</sup>/O 工艺中二沉池污泥上浮的原因与对策[J]. 中国给水排水,2010,26(13):43-45.
- Wang Sheping, Shao Junfeng, Wan Qiong, *et al.* Causes and countermeasures on sludge floating in secondary sedimentation tank in A<sup>2</sup>/O process [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(13): 43-45 (in Chinese).
- [9] 葛勇涛,焦阳,李军,等. 乙酸钠碳源强化生物滤池对二沉池出水的脱氮效果[J]. 中国给水排水,2011,27(7):98-100.
- Ge Yongtao, Jiao Yang, Li Jun, *et al.* Sodium acetate as carbon source for enhancing nitrogen removal from secondary effluent with biological filter [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(7): 98-100 (in Chinese).
- [10] 徐建宇,陈腾殊,罗阳,等. 回流污泥比对厌氧释磷效果的影响[J]. 云南化工,2001,38(1):20-23.
- Xu Jianyu, Chen Tengshu, Luo Yang, *et al.* Effect of recycle ratio on phosphorus removal of anaerobic process [J]. Yunnan Chemical Technology, 2001, 38(1): 20-23 (in Chinese).



作者简介:董姗姗(1977—),女,安徽明光人,博士,讲师,主要从事污水处理工艺仿真及优化研究。

E-mail: wydeccr@163.com

收稿日期:2018-04-23