

# 氧化沟工艺污水处理厂的活性污泥特性分析

吴代顺, 方燕蓝

(福建师范大学福清分校 海洋与生化工程学院, 福建 福清 350300)

**摘要:** 结合某氧化沟工艺污水厂对主要污染物的去除效果,对其活性污泥特性进行了分析。结果表明:系统中活性污泥在厌氧搅拌前0.5 h的平均比厌氧释磷速率为 $1.10 \text{ mgPO}_4^{3-} - \text{P}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$ ,厌氧释磷效果较差;平均比好氧吸磷速率为 $6.30 \text{ mgPO}_4^{3-} - \text{P}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$ ,比缺氧吸磷速率为 $2.83 \text{ mgPO}_4^{3-} - \text{P}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$ ,反硝化聚磷菌占总聚磷菌的比例为44.9%;比硝化速率为 $7.55 \text{ mgNH}_4^+ - \text{N}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$ ,硝化效果良好;比反硝化速率存在明显的3个变化阶段,其中第1阶段比反硝化速率最大,为 $5.79 \text{ mgNO}_3^- - \text{N}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$ ,第2阶段比反硝化速率次之,为 $2.23 \text{ mgNO}_3^- - \text{N}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$ ,第3阶段的最小,为 $0.82 \text{ mgNO}_3^- - \text{N}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$ ,活性污泥的比反硝化速率总体较低。为此,建议将原连续非限制曝气运行方式改为间歇曝气方式,并在缺氧区投加适量碳源,以提高系统的脱氮除磷效果。

**关键词:** 氧化沟; 活性污泥; 比厌氧释磷速率; 比好氧/缺氧吸磷速率; 比硝化速率; 比反硝化速率

中图分类号: TU992.3 文献标识码: C 文章编号: 1000-4602(2018)11-0109-05

## Characteristic Analysis on Activated Sludge in a Wastewater Treatment Plant with Oxidation Ditch Process

WU Dai-shun, FANG Yan-lan

(School of Oceanographic and Biochemical Engineering, Fuqing Branch, Fujian Normal University, Fuqing 350300, China)

**Abstract:** Based on the major pollutants removal performances in a wastewater treatment plant (WWTP) with oxidation ditch process, a characteristic analysis on the activated sludge was performed. Results showed a poor performance in phosphorus release, with a specific phosphorus release rate in the first 0.5 hour ( $\text{SPRR}_{0.5}$ ) of  $1.10 \text{ mgPO}_4^{3-} - \text{P}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$ ; the average specific phosphorus uptake rates under aerobic (ASPUR) and anoxic (NSPUR) conditions were  $6.30 \text{ mgPO}_4^{3-} - \text{P}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$  and  $2.83 \text{ mgPO}_4^{3-} - \text{P}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$ , respectively; the proportion of the denitrifying phosphorus accumulating bacteria (DNPAO) to the phosphorus accumulating bacteria (PAO) was 44.9%; the specific nitrification rate (SNR) was  $7.55 \text{ mgNH}_4^+ - \text{N}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$ , indicating a good nitrification performance; the specific denitrification rate (SDR) could be divided into three stages, i. e.  $5.79 \text{ mgNO}_3^- - \text{N}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$ ,  $2.23 \text{ mgNO}_3^- - \text{N}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$ , and  $0.82 \text{ mgNO}_3^- - \text{N}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$ , generally showing a low denitrification rate. It was suggested that the original continuous non-limiting aeration oper-

ation should be changed to an intermittent aeration operation, and an appropriate amount of carbon source should be added into the anoxic zone to improve the removal of nitrogen and phosphorus.

**Key words:** oxidation ditch; activated sludge; specific phosphorus release rate; specific aerobic/anoxic phosphorus uptake rate; specific nitrification rate; specific denitrification rate

活性污泥是城市污水处理厂生化反应系统的核心,其特性直接影响到污染物的去除效果和污水处理厂的稳定运行。氧化沟工艺是一种先进的生物处理技术,具有出水水质好、管理便捷、运行稳定等优点,Carrousel 氧化沟作为其代表在世界范围内得到了广泛应用。笔者结合南方某污水处理厂 Carrousel 氧化沟工艺的运行实践,对该污水厂的活性污泥特性进行分析,考察了活性污泥的比厌氧释磷速率 (SPRR)、比好氧/缺氧吸磷速率 (AS<sub>PUR</sub>/NS<sub>PUR</sub>)、比硝化速率 (SNR) 和比反硝化速率 (SDR),以期为该污水处理厂的提标和提效提供改进建议,同时为类似工艺的优化运行提供参考。

## 1 材料与方法

## 1.1 工程概况

该污水处理厂的一期设计规模为  $2.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ，二期设计规模为  $4.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ，均采用 Carroussel 2000 型氧化沟工艺，工艺流程如图 1 所示。经过预处理的污水和回流污泥一起进入氧化沟的厌氧段，进行厌氧释磷；厌氧段出水进入缺氧段，进行反硝化脱氮；好氧段内设倒伞型表曝机供氧，曝气模式为延时连续曝气，在好氧段与缺氧段间设置内回流门，通过回流门开启度控制内回流比；二沉池出水经紫外线消毒后达标排放。出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 的一级 B 标准。

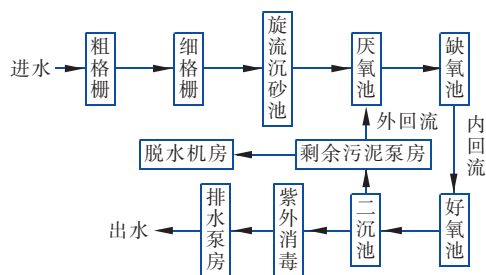


图1 某污水处理厂的工艺流程

Fig. 1 Flow chart of a wastewater treatment plant

### 1.2 活性污泥特性分析

### ① 比厌氧释磷速率的测定

取一期和二期氧化沟好氧区在线监测点处(此处位于好氧区末端,污泥中的聚磷菌已充分吸磷并携带高能物质 ATP,以便在后续厌氧条件下水解成 ADP 同时释磷)的泥水混合液各 2 L,混合静置 5 min 后去除上清液,将余下的污泥均分为 3 份分别移入 3 个小试反应器中。取经细格栅过滤后的原水 4 L 加入到上述 3 个反应器中,另取 1 个反应器加入 4 L 原水作为空白对照。4 个反应器中分别加入等量、等浓度的醋酸钠,使得初始 COD 浓度在 500 mg/L 以上,密封厌氧并匀速搅拌,开始厌氧释磷速率测定试验。在 0、30 和 40 min 时分别取样测定溶液的 TP 和 MLVSS 浓度,计算 30 和 40 min 的比厌氧释磷速率<sup>[1]</sup>。

### ② 比好氧/缺氧吸磷速率的测定

将上述经厌氧释磷试验结束的泥水混合液继续厌氧搅拌,至其充分释磷后静置 5 min 去除上清液,将污泥均分为 3 份放入 3 个反应器中并用原水加至 4 L,设原水空白对照试验。分别加入等量、等浓度的  $\text{KNO}_3$  溶液使初始  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度为 30 mg/L 左右,匀速搅拌 30 min 后取样,然后同时开始曝气。

好氧吸磷 30 min 后分别取样测定缺氧和好氧条件下的 TP 和 MLVSS 浓度,并计算聚磷菌在缺氧和好氧条件下的比吸磷速率,缺氧吸磷速率与好氧吸磷速率的比值反映了系统中反硝化聚磷菌(DN-PAO)占总聚磷菌(PAO)的比例<sup>[1]</sup>。

### ③ 比硝化速率的测定

从一期和二期氧化沟的缺氧区出口处同时各取泥水混合液 2 L, 静置后去除上清液, 将污泥平均倒入 3 个反应器中, 并用原水加至 4 L, 另一个反应器中装 4 L 原水作为空白对照试验, 再分别加入等量、等浓度的氯化铵溶液, 随后加入 1 mol/L 的 NaOH 和 HCl 溶液调节混合液 pH 值至 7.0 左右, 同时开启曝气设备。每隔一定时间取样测定  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和 MLVSS 浓度。根据测得的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度与取样时间  $t$  的关系, 绘出回归曲线, 并求出比硝化速率<sup>[1]</sup>:

$$\text{SNR} = \frac{b}{\text{MLYSS}/1\,000} \quad (1)$$

式中:SNR 为比硝化速率,  $\text{mgNH}_4^+ - \text{N}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$ ;  $b$  为线性回归方程的截距。

#### ④ 比反硝化速率的测定

取一期和二期氧化沟好氧区的在线监测点泥水混合液各 2 L,混合静置 10 min 后去除上清液,将余下污泥分别加入反应器中,向反应器中加入相同体积的原水使混合液体积达到 4 L,经混合均匀后,同时各加入 0.08 g 硝酸钾 ( $\text{KNO}_3$ ) 和丙烯基硫脲 (ATU,可以抑制亚硝化细菌的活性,从而抑制活性污泥的硝化反应)<sup>[2]</sup>,控制混合液中的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  初始浓度在 20 mg/L 左右,反应温度控制在 22 ℃ 左右。

### 1.3 测定项目与方法

COD、TN、TP:参考《水和废水监测分析方法》进行测定;氨氮:纳氏试剂分光光度法;硝态氮:紫外分光光度法;DO:碘量法;MLSS、MLVSS:重量法;污泥沉降比(SV)和污泥体积指数(SVI):量筒沉降法。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 污水厂的处理效果及污泥活性

该污水处理厂 2015 年 8 月—2016 年 8 月的进、出水水质如下:进水 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 和 TP 平均浓度分别为 132.12、19.65、50.63、2.39 mg/L,出水平均浓度分别为 13.54、1.38、22.29、0.73 mg/L,平均去除率分别为 89.75%、92.98%、55.97%、69.45%。出水水质除 TN 外均比较稳定,满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 B 标准;系统对 COD 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除效果良好,但对 TP 和 TN 的去除效果较差。

该污水厂进水 C/N 平均值为 2.6,进水 C/P 值约为 55。实际进水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  平均浓度为 19.65 mg/L,出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  平均浓度 <1.5 mg/L,平均去除率为 92.98%,系统硝化效果良好;进水 TN 平均浓度为 50.63 mg/L,平均去除率为 55.97%;进水 TP 平均浓度为 2.39 mg/L,出水 TP 浓度在 1.0 mg/L 以下,平均去除率为 69.45%。该污水处理厂出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和 TP 浓度均可稳定达标,但出水 TN 浓度波动较大,不能稳定达到国家一级 B 排放标准(TN  $\leq 20$  mg/L)。

试验期间对好氧池的活性污泥特性进行检测分析,结果表明:活性污泥的 MLSS 浓度在 2 550 ~ 5 800 mg/L 之间(平均为 3 834 mg/L),MLVSS 浓度在 850 ~ 2 800 mg/L 之间(平均为 1 480 mg/L),

MLVSS/MLSS 值在 33.4% ~ 49.1% 之间;SV 值在 28% ~ 84% 之间(平均为 68%),SVI 值在 57 ~ 115 mL/g 之间(平均为 85 mL/g)。污泥中的有机成分所占比例较小,因此,该污泥中的活性细胞所占比例也较小。

### 2.2 活性污泥的比厌氧释磷速率

该氧化沟系统中的活性污泥在前 30 min 的平均比厌氧释磷速率( $\text{SPRR}_{0.5}$ )为  $1.10 \text{ mgPO}_4^{3-} - \text{P}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$ ,前 40 min 的平均比厌氧释磷速率( $\text{SPRR}_{0.66}$ )为  $0.86 \text{ mgPO}_4^{3-} - \text{P}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$ 。整个试验过程中溶液的溶解氧浓度控制在 0.2 mg/L 以内。通常聚磷菌的平均释磷速率可达到  $0.137 \text{ mg}/(\text{mg} \cdot \text{d})$ <sup>[3]</sup>,而本试验中测得的比厌氧释磷速率相对较低。分析原因主要有:①厌氧池较高的氧化还原电位(ORP)影响了生物除磷效果。尽管整个试验过程中溶解氧浓度控制在 0.2 mg/L 以下,但是 ORP 较高(经实测为  $-60 \sim -10 \text{ mV}$ ),回流污泥携带的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  较多,即好氧区曝气时间过长,对厌氧释磷造成抑制。在工程运行中要防止由于回流污泥中含高浓度的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$  等氧化态物质而引起 ORP 较高,从而影响生物释磷效果。②进水碳源不足,主体工艺在脱氮和除磷过程中存在竞争碳源的问题,碳源无法满足聚磷菌的生长要求。③进水中的工业废水和屠宰场废水可能含有对聚磷菌有生物毒性作用的物质,这需要进一步检测分析确定。

### 2.3 活性污泥的比吸磷速率

大量研究表明,在缺氧条件下反硝化聚磷菌能以硝酸盐作为电子受体进行吸磷反应,在适当条件下可以同时去除氮和磷,并能一碳两用,大幅度降低后续好氧处理的能耗和污泥产量<sup>[4]</sup>。该污水处理厂采用的氧化沟工艺存在脱氮和除磷竞争碳源的问题,强化氧化沟工艺的反硝化除磷功能,对提高低 C/N 值污水的脱氮除磷效率及降低运行能耗具有重要的意义<sup>[5]</sup>。在本试验中,测得活性污泥的平均比缺氧吸磷速率为  $2.83 \text{ mgPO}_4^{3-} - \text{P}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$ ,平均比好氧吸磷速率为  $6.30 \text{ mgPO}_4^{3-} - \text{P}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$ ,二者之比  $R_{\text{DPAO}} \approx 44.9\%$ ,表明体系中存在一定程度的同步反硝化除磷,反硝化聚磷菌占总聚磷菌的比例为 44.9%,低于文献报道的 70%<sup>[1]</sup>。在碳源充足的情况下, $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度是决定吸磷程度的限制性因素,当  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度在 25 ~ 45 mg/L



时,TP去除效果最好<sup>[6]</sup>,而试验中混合液的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度为 $30 \text{ mg/L}$ ,可排除 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的影响。推断可能是由于缺氧段水力停留时间为 $1 \text{ h}$ ,较短的水力停留时间导致吸磷反应进行得不彻底,适当延长缺氧池的水力停留时间有利于提高除磷效果<sup>[7]</sup>。

## 2.4 活性污泥的比硝化速率

根据比硝化速率测定试验结果绘制线性回归曲线,如图2所示。根据线性回归方程 $y = -4.1079x + 11.548$ ,求得该活性污泥系统的平均比硝化速率(SNR)为 $7.55 \text{ mgNH}_4^+ - \text{N}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$ 。一般活性污泥的比硝化速率为 $1.95 \text{ mgNH}_4^+ - \text{N}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$ <sup>[1]</sup>。结合该污水厂较高的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率(92.98%),可知该污水厂的活性污泥具有良好的硝化功能。

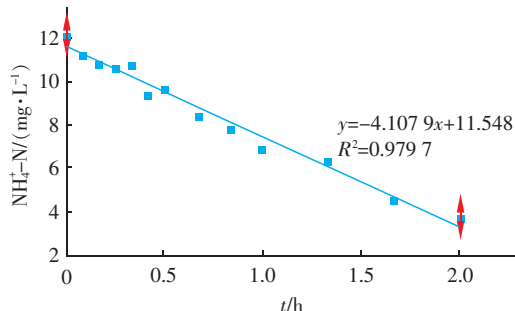


图2 比硝化速率测定试验中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度的变化

Fig.2 Change of ammonia nitrogen concentration in specific nitrification rate test

## 2.5 活性污泥的比反硝化速率

比反硝化速率测定试验中硝态氮浓度的变化如图3所示。

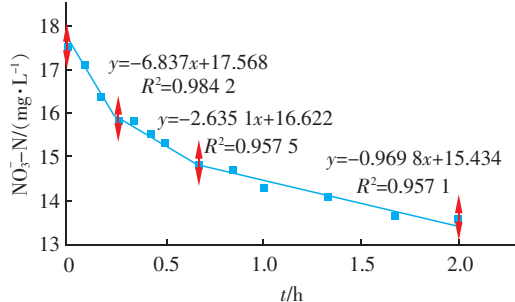


图3 比反硝化速率测定试验中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度的变化

Fig.3 Change of nitrate nitrogen concentration in specific denitrification rate test

由图3可以看出,比反硝化速率存在明显的3个变化阶段:第1阶段为 $0 \sim 15 \text{ min}$ ,该阶段的平均比反硝化速率为 $5.79 \text{ mgNO}_3^- - \text{N}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$ ;

第2阶段为 $15 \sim 45 \text{ min}$ ,该阶段平均比反硝化速率为 $2.23 \text{ mgNO}_3^- - \text{N}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$ ;第3阶段为 $45 \sim 120 \text{ min}$ ,该阶段平均比反硝化速率为 $0.82 \text{ mgNO}_3^- - \text{N}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$ 。这3个阶段的平均比反硝化速率逐渐降低,第1阶段的比反硝化速率最大,主要是因为此阶段的快速可生物降解有机物较充足<sup>[8]</sup>,此时比反硝化速率与反硝化菌数量有关,而与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度关系不大;第2阶段比反硝化速率明显降低,是由于能被反硝化菌直接利用的碳源在第1阶段基本消耗完毕,该阶段需要分解慢速可生物降解有机物来进行反硝化反应;第3阶段的比反硝化速率最低,主要是因为可生物降解的碳源在前两个阶段已经基本消耗完,反硝化菌只能利用内源性碳源即微生物通过内源呼吸新陈代谢产物作为碳源进行反硝化反应。通常第1、2和3阶段的比反硝化速率分别为 $13.09 \sim 20.20$ 、 $4.24 \sim 5.55$ 、 $1.91 \sim 3.44 \text{ mgNO}_3^- - \text{N}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$ <sup>[9]</sup>。本试验中3个阶段的平均比反硝化速率均低于上述值,表明该污水厂活性污泥的反硝化能力较低。分析原因可能是污水中易降解的可溶性有机物不足,为此可考虑适当投加外碳源,比如乙酸钠。

## 3 结论与建议

① 该氧化沟系统中活性污泥前 $30 \text{ min}$ 的平均比厌氧释磷速率较低,为 $1.10 \text{ mgPO}_4^{3-} - \text{P}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$ 。建议在进水碳源不足时适当补充外碳源,并严格控制进入厌氧区的混合液硝态氮浓度,使聚磷菌在厌氧区充分释磷,提高后续的吸磷效果。

② 该氧化沟系统中活性污泥的比缺氧吸磷速率为 $2.83 \text{ mgPO}_4^{3-} - \text{P}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$ ,比好氧吸磷速率为 $6.30 \text{ mgPO}_4^{3-} - \text{P}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$ ,反硝化聚磷菌占总聚磷菌的44.9%。建议适当延长缺氧池的水力停留时间,这有利于提高除磷效果。

③ 该氧化沟中活性污泥的比硝化速率约为 $7.55 \text{ mgNH}_4^+ - \text{N}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$ ,硝化效果良好,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度远低于国家一级B标准限值。建议氧化段采用间歇曝气技术,以节省能耗。

④ 该氧化沟中活性污泥的比反硝化速率存在明显的3个变化阶段:第1阶段的比反硝化速率最大,为 $5.79 \text{ mgNO}_3^- - \text{N}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$ ;第2阶段的比反硝化速率次之,为 $2.23 \text{ mgNO}_3^- - \text{N}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$ ;第3阶段的比反硝化速率最小,为 $0.82 \text{ mgNO}_3^- - \text{N}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$ 。

$\text{NO}_3^- - \text{N}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$ 。总体比反硝化速率较低,该污水厂在实际运行中应保证缺氧区有充足的碳源。

### 参考文献:

- [1] 罗固源,张园,许晓毅. SUFR 系统中活性污泥特性及反硝化除磷稳定性[J]. 环境科学研究,2011,24(1): 85-89.  
Luo Guyuan, Zhang Yuan, Xu Xiaoyi. Characteristics of activated sludge and stability of denitrifying phosphorus removal in SUFR system[J]. Research of Environmental Sciences, 2011, 24(1): 85-89 (in Chinese).
- [2] 徐晓妮,王社平,张日霞,等. 西安市第三污水处理厂 Orbal 氧化沟反硝化速率测定分析[J]. 科学技术与工程,2009,9(24):7576-7579.  
Xu Xiaoni, Wang Sheping, Zhang Rixia, et al. The determination analysis of the denitrification rate for Orbal oxidation ditch in No. 3 Wastewater Treatment Plant of Xi'an[J]. Science Technology and Engineering, 2009, 9(24): 7576-7579 (in Chinese).
- [3] 任健,李军,苏雷,等. 酸化液对厌氧释磷好氧吸磷速率的影响研究[J]. 环境工程,2011,29(s1):103-107.  
Ren Jian, Li Jun, Su Lei, et al. Study on the effect of dosing hydrolysate on anaerobic phosphorus release and aerobic phosphorus uptake rate[J]. Environmental Engineering, 2011, 29(s1): 103-107 (in Chinese).
- [4] 崔玉波,尹军. 缺氧吸磷与反硝化问题的探讨[J]. 中国给水排水,2003,19(8):33-35.  
Cui Yubo, Yin Jun. Discussion on anoxic phosphorus uptake and denitrification[J]. China Water & Wastewater, 2003, 19(8): 33-35 (in Chinese).
- [5] 吴昌永,彭永臻,彭轶.  $\text{A}^2/\text{O}$  工艺的反硝化除磷特性研究[J]. 中国给水排水,2008,24(15):11-14.  
Wu Changyong, Peng Yongzhen, Peng Yi. Study on characteristics of denitrifying phosphorus removal in  $\text{A}^2/\text{O}$  process[J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(15): 11-14 (in Chinese).
- [6] 吕小梅,李继,邵培兵. 反硝化除磷工艺中缺氧吸磷的影响因素[J]. 环境科学与技术,2010,33(S1):211-214.  
Lv Xiaomei, Li Ji, Shao Peibing. Factors affecting anoxic phosphorus assimilating in denitrifying phosphorus removal process[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33(S1): 211-214 (in Chinese).
- [7] 仲志鸿,陈俊,陈波,等. 低碳源改良  $\text{A}^2/\text{O}$  工艺中预缺氧池低温下的运行探讨[J]. 给水排水,2014,40(1):31-33.  
Zhong Zhihong, Chen Jun, Chen Bo, et al. Analysis on the operation of pre-anoxic tank in improved  $\text{A}^2/\text{O}$  process for low carbon concentration wastewater treatment at low temperature[J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 40(1): 31-33 (in Chinese).
- [8] 王社平,王卿卿,惠灵灵,等. 分段进水  $\text{A}/\text{O}$  脱氮工艺反硝化速率的测定[J]. 环境工程,2008,26(3):56-58.  
Wang Sheping, Wang Qingqing, Hui Lingling, et al. The determination of denitrification rate of step-feed  $\text{A}/\text{O}$  nitrogen removal process[J]. Environmental Engineering, 2008, 26(3): 56-58 (in Chinese).
- [9] 赵庆彬,毕学军,臧海龙,等. 不同碳源对活性污泥反硝化能力的影响研究[J]. 环境工程,2013,31(5):127-131.  
Zhao Qingbin, Bi Xuejun, Zang Hailong, et al. Effect of different carbon-sources on denitrification of the activated systems[J]. Environmental Engineering, 2013, 31(5): 127-131 (in Chinese).



作者简介:吴代顺(1976-),男,福建建瓯人,硕士,副教授,研究方向为水污染控制工程。

E-mail:765102712@qq.com

收稿日期:2018-01-03