

# 基于全流程分析的污水厂高硝态氮进水优化运行

陈明飞<sup>1</sup>, 郑凯凯<sup>1,2</sup>, 王 燕<sup>1,2</sup>, 高俊贤<sup>1</sup>, 王 硕<sup>1,3,4</sup>, 李 激<sup>1,3,4</sup>  
(1. 江南大学 环境与土木工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 无锡普汇环保科技有限公司, 江苏 无锡 214028; 3. 江苏省厌氧生物技术重点实验室, 江苏 无锡 214122; 4. 江苏高校水处理技术与材料协同创新中心, 江苏 苏州 215009)

**摘 要:** 常州市某污水处理厂受上游工业废水的影响, 进水中含有高浓度的硝态氮, 出水总氮无法实现达标排放。针对该污水厂现状, 开展了全流程采样分析, 结合理论分析与实际全流程测试数据总结得出, 目前内回流量是限制脱氮效率提高的主要因素。碳源比选及投加量试验发现, 甲醇的脱氮效果优于乙酸钠, 通过计算可知该污水厂适宜的外加碳源系数为 4.2, 并核算了去除 20 和 30 mg/L 硝态氮的吨水外加甲醇费用, 可为该污水厂后续的优化运行提供基础性数据。

**关键词:** 硝态氮; 全流程分析; 内回流比; 甲醇

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)17-0118-06

## Optimized Operation of a Wastewater Treatment Plant with High Nitrate Nitrogen Concentration Influent Based on Whole Process Analysis Method

CHEN Ming-fei<sup>1</sup>, ZHENG Kai-kai<sup>1,2</sup>, WANG Yan<sup>1,2</sup>, GAO Jun-xian<sup>1</sup>,  
WANG Shuo<sup>1,3,4</sup>, LI Ji<sup>1,3,4</sup>

(1. School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Wuxi Puhui Environmental Protection Technology Co. Ltd., Wuxi 214028, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Anaerobic Biotechnology, Wuxi 214122, China; 4. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Water Treatment Technology and Materials, Suzhou 215009, China)

**Abstract:** The influent quality of a wastewater treatment plant (WWTP) in Changzhou was affected by upstream industrial wastewater containing high concentration nitrate nitrogen, which leads to the effluent total nitrogen couldn't reach the discharge standard. Based on the current situation of the WWTP, a whole process sampling analysis was carried out. It was found that the current internal reflux flow was the main factor limiting the further improvement of nitrogen removal efficiency according to theoretical analysis and actual whole process test data. The carbon source comparison and dosing test showed that the denitrification effect of methanol was better than that of sodium acetate, and the calculated appropriate external carbon source dosing coefficient of the WWTP was 4.2. Finally, the cost of external methanol for removing 20 mg/L and 30 mg/L nitrate nitrogen per ton wastewater was calculated, which could provide basic data for the subsequent operational optimization of the WWTP.

**Key words:** nitrate nitrogen; whole process analysis; internal reflux ratio; methanol

在一些工业发达地区,氮素污染迅速加剧,生态环境中的氮失去了平衡,以致水体和大气中的氮元素过量<sup>[1-2]</sup>,成为众多水体和流域亟待去除的污染元素。目前,污水中的氮素主要表现为氨氮、硝态氮、亚硝态氮及有机氮等形式。生态环境中的氮经过氨化、硝化、反硝化和固氮作用等方式实现不同氮形态间的转化<sup>[3]</sup>。氮素污染有诸多危害,当还原态氮排入水体时,硝化反应会消耗水体中大量的溶解氧<sup>[3]</sup>,在生成硝态氮的同时,导致水体发生黑臭和多种水生生物的慢性灭迹。因此,对水体中氮素污染的控制越来越受到人们的重视。典型污水处理厂进水中的氮主要以有机氮和氨氮为主,基本无硝态氮,硝态氮一般由工业企业排放的废水引入。

笔者针对常州市某污水处理厂出水总氮超标问题,采用全流程分析方法获知该污水厂高浓度硝态氮进水是受上游光伏工业废水的影响,根据相关试验进行相应的工艺调整并制定合适的碳源投加方案,以实现出水总氮的稳定达标。

## 1 材料与方法

### 1.1 常州市某污水厂概况

常州市某污水处理厂的服务范围包括两个工业园区和部分城镇区域,始建于2004年,运行规模为 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,主体工艺为SBR;2008年进行了提标改造,扩建后总规模为 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,主体工艺为预处理(旋流沉砂池)+水解酸化+AAO+活性砂滤池。工艺特点:单点进水;利用控制堰控制内回流,不计流量;外回流比为75%;采用次氯酸钠消毒。尾水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A排放标准。污水处理厂工艺流程如图1所示。

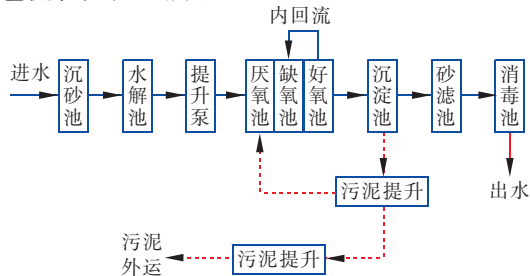


图1 污水处理厂工艺流程

Fig. 1 Flow chart of wastewater treatment plant process

目前污水处理厂整体运行情况较为稳定,出水指标中除TN外基本满足GB 18918—2002的一级A标准。但相较于周边数座污水处理厂的进水水质,该污水厂进水水质(尤其是TN)明显异常,存在超负荷运行的现象。检测得知,进水 $\text{BOD}_5/\text{COD}$ 平均值仅为0.35,可生化性一般<sup>[4]</sup>,同时 $\text{BOD}_5/\text{TN}$ 平均值为3.84,理论上 $\text{BOD}_5/\text{TN}$ 值 $>2.86$ 即可满足脱氮要求,但实际运行过程中污水处理厂由于溶解氧与硝酸盐竞争电子供体,一般需要碳氮比 $>5$ 才能满足脱氮要求,该污水厂碳氮比处于较低水平,且波动性大,这在一定程度上制约了生物脱氮效果。因此,进水水质较大的波动性以及碳源不足可能是影响出水水质稳定达标排放的限制因素。

### 1.2 分析项目及方法

$\text{COD}$ 、 $\text{TN}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{TP}$ 、 $\text{BOD}_5$ 采用国标法测定, $\text{DO}$ 和 $\text{pH}$ 值采用WTW Oxi/pH-3310便携式溶解氧仪测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 生化池全流程硝态氮数据分析

全流程硝态氮分析结果表明,该污水处理厂进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为 $69.9 \text{ mg/L}$ ,远超常规污水处理厂进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 水平(一般进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度为 $0 \sim 2 \text{ mg/L}$ )。对上游管网水质进行普查发现,这是由于某光伏企业排放的高浓度硝态氮废水冲击导致的。因为高 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 进水需要更多的碳源来进行反硝化,所以该污水处理厂自2017年起发现该问题后,迅速进行了工艺调控,在厌氧段投加大量碳源,虽然有效缓解了高浓度硝态氮进水带来的冲击影响,但整体运行成本显著增加。

### 2.2 推进式生化池内回流口沿程氮组分变化分析

该污水处理厂生化段采用常规AAO工艺,通过增大内回流量提高回流 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量可以有效改善脱氮效果<sup>[5]</sup>,但回流比也不能无限地增大,因为一方面会增加运行费用,另一方面反硝化池为缺氧环境,而回流的硝化液中携带有一定量的溶解氧,回流量过大会使缺氧池难以保持理想的缺氧状态,抑制反硝化的脱氮效果。

根据全流程试验,缺氧池中各点 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的浓度均不高,为判断该污水处理厂生化池内回流情况,针对生化池内回流口进行了沿程氮组分变化分析。

根据内回流口沿程变化,采样点分布如图2所示。A~G为好氧池末至好氧池进水口的沿程采样点,①~⑦为缺氧池末—内回流口—缺氧池中沿程采样点。另外,分析了生化池内回流口沿程硝态氮及溶解氧的变化情况,结果如图3所示。

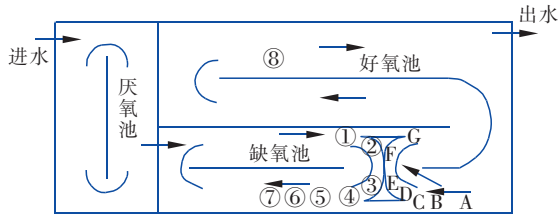


图2 生化池内回流沿程采样点分布

Fig.2 Distribution of sampling points along internal reflux in biochemical tank

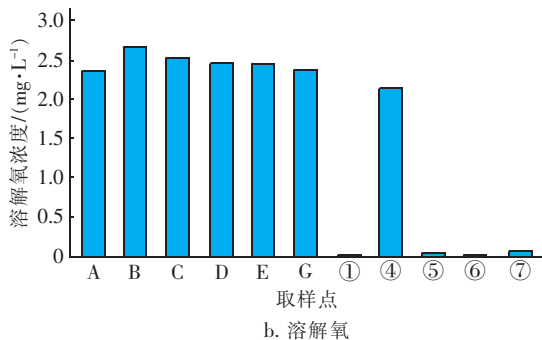
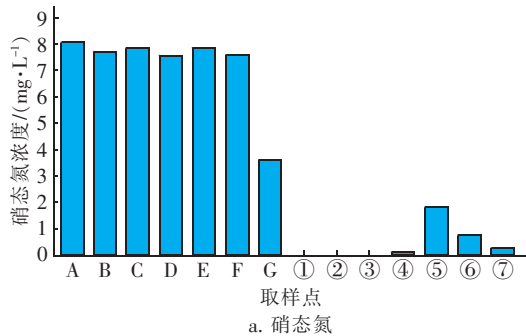


图3 生化池推进式内回流口沿程硝态氮和溶解氧的变化

Fig.3 Change of nitrate nitrogen and dissolved oxygen along stage of biochemical tank propulsion internal reflux

由图3(a)可知,A~F点 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度未发生明显的变化, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的平均浓度在7.5 mg/L以上,G点为好氧池末混合液与缺氧池混合液开始混合处,该点 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度开始下降,G点右端为好氧池回流水与缺氧池末端水完全混合处,取样测定, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度降至0.13 mg/L。①~③为缺氧池末端混合液在池内循环并流向内回流口, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度维持在较低水平;④~⑦为缺氧池混合液与好氧

池回流液混合的沿程各点, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度先上升而后减小, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度从最大处的1.84 mg/L迅速降低至0.27 mg/L。

在原设计条件下,300%的回流混合液携带了大量溶解氧,且回流量在缺氧池总水量中占比较大,因此在混合前段,溶解氧不会迅速降为零,同时由于未达到缺氧状态,也不会发生反硝化反应, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度的降低也只是缺氧池水流稀释的作用。但根据测试结果发现,在缺氧池回流口沿程的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度以及DO都急剧下降,见图3(b),这可能是因为内回流不足,并未达到300%的回流量。

根据流速仪测试结果发现,内回流比最大约为200%,低于设计的300%,这是由于设计上内回流廊道口狭窄、推流形成短流造成的,相对目前进水总氮条件而言,该回流量不能满足脱氮需求,不能保证有足够的硝态氮回流至缺氧池进行反硝化脱氮,制约系统对氮组分的有效去除。

同时,由于AAO工艺本身的缺陷,存在一个脱氮极限,该极限去除率的计算见式(1)。

$$\text{极限去除率} = \frac{(r+R) \times \mu}{1+R+r} \quad (1)$$

式中: $R$ 为外回流比; $r$ 为内回流比; $\mu$ 为脱氮的效率。

在理想状态下,当缺氧池碳源充足,且内回流充分时,脱氮效率选取为95%(江苏地区常规污水处理厂该值一般为70%~95%),算出的值即为AAO的脱氮极限。

因此在目前内回流比为200%、外回流比为70%、外加充足碳源、能形成严格的缺氧环境并搅拌充分的条件下,假设缺氧池的脱氮效率达到95%,则污水处理厂最大的脱氮效率为69%。如该污水处理厂按照出水 $\text{TN} \leq 12 \text{ mg/L}$ 控制,考虑预处理段对非溶解性TN的去除,则进入生化段的溶解性总氮(STN)浓度不宜超过39 mg/L。

如果内回流比提升为300%,其余条件不变,则污水处理厂最大脱氮效率为75%。如该污水厂按照出水 $\text{TN} \leq 12 \text{ mg/L}$ 控制,则进入生化段的STN浓度不宜超过48 mg/L。因此,提高内回流比可以有效提高氮负荷。

### 2.3 现有工艺外碳源投加量及其经济性分析

由于该污水处理厂出水TN浓度高主要是因为进水TN浓度高导致的,因此重点是加强外围源头

控制<sup>[6]</sup>。对于污水厂内的运行调控,需要使现有工艺中的缺氧段发挥最大反硝化功能<sup>[7]</sup>。

全流程分析结果表明,目前缺氧段的工艺状态控制已达到最佳状态,DO、ORP 和搅拌等运行参数均控制较好<sup>[8]</sup>,进水溶解性 COD 占比较低,而其中可被微生物利用的碳源也较少,进水  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度较高,需要更多的碳源进行反硝化脱氮,可通过在缺氧池和厌氧池外加碳源的方式,使出水水质达标。

### 2.3.1 反硝化速率及反硝化潜力分析

该污水处理厂生化池中污泥的反硝化速率曲线如图4所示。可知,在5 h 内生化的活性污泥的反硝化过程分为2段,第1段利用进水中的易降解碳源进行反硝化,反硝化速率为  $2.28 \text{ mgNO}_3^- - \text{N}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$ ;第2段利用剩余碳源,反硝化速率下降明显,为  $0.0005 \text{ mgNO}_3^- - \text{N}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$ ,两个阶段的 MLVSS 均为  $1816 \text{ mg/L}$ 。

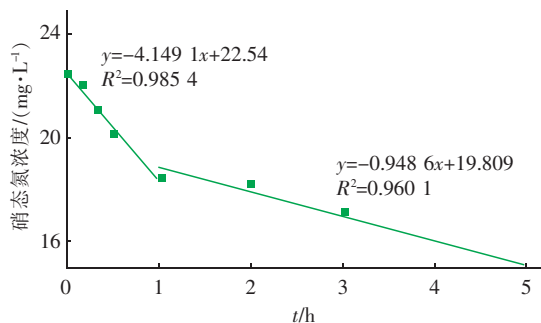


图4 污水处理厂生化池中污泥的反硝化速率曲线

Fig. 4 Denitrification rate curve of sludge in biochemical tank of wastewater treatment plant

该污水处理厂生化池中污泥的反硝化潜力曲线如图5所示。缺氧池的 HRT 为 6 h,分析表明,反硝化潜力为  $3.21 \text{ mgNO}_3^- - \text{N}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$ ,反硝化速率为  $3.21 \text{ mgNO}_3^- - \text{N}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$ 。活性污泥利用易降解碳源的反硝化过程很快,反硝化潜力良好。

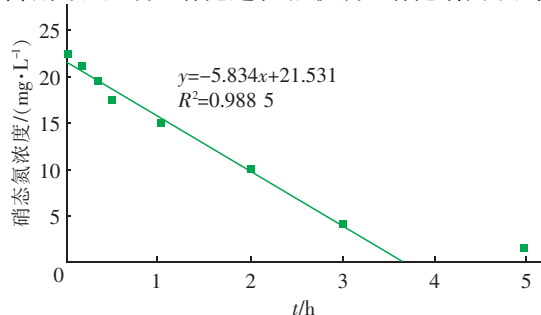


图5 污水处理厂生化池中污泥的反硝化潜力

Fig. 5 Denitrification potential of sludge in biochemical tank of wastewater treatment plant

通过污水厂实际情况以及污泥浓度核算发现,目前该工艺可去除的硝态氮为  $35 \text{ mg/L}$ 。对比进水水质,在碳源投加充足的情况下,该污水厂活性污泥的硝化能力可基本满足脱氮要求。

### 2.3.2 碳源种类对比分析

碳源种类对反硝化效果有重大影响<sup>[8]</sup>,如果碳源种类不同,则最佳碳氮比也会随之改变。因此,选取两种常用外加碳源(乙酸钠和甲醇)进行对比试验,探究污水处理厂外加碳源种类对污泥反硝化能力的影响。

图6为活性污泥不同碳源的反硝化潜力。可以看出,当活性污泥利用乙酸钠和甲醇作为碳源降解硝态氮时,反应 180 min 后  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度分别为  $17.4$  和  $0.5 \text{ mg/L}$ ,较初始  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度分别降低了  $7.1$  和  $24.4 \text{ mg/L}$ 。污水处理厂活性污泥利用乙酸钠和甲醇作为碳源进行反硝化的能力有很大不同,甲醇较乙酸钠更容易被活性污泥利用,脱氮效果更为明显。

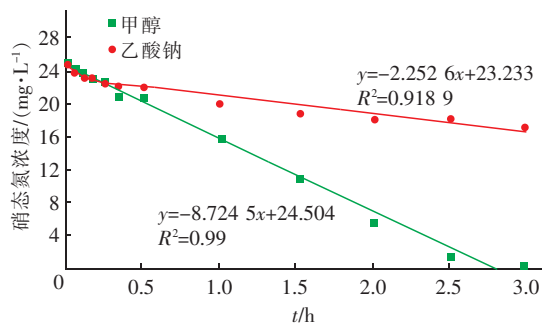


图6 活性污泥不同碳源的反硝化潜力

Fig. 6 Denitrification potential of different carbon sources for activated sludge

结合污水厂内工作人员的实际操作经验,若想达到相同的脱氮效果,乙酸钠的投加量一般为甲醇的 4~6 倍,经济效果不佳,运行费用显著增加。所以利用甲醇作为碳源一方面有利于达到脱氮效果,另一方面也利于降低运行成本。但甲醇易燃易爆,存在一定的安全隐患,采用甲醇作为碳源时,需加强安全检查和安全防范措施。

### 2.3.3 外加碳源经济分析

针对该污水厂进行外加碳源经济分析,以确定最适碳源投配比,降低运行成本。根据大量反硝化潜力试验结果,统计该污水厂去除单位  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  所需的 COD,即碳源投配比,结果如表1所示。根据表1的结果,取平均值 4.2 作为外加碳源的投加系



数,处理量为  $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,甲醇单价为 3 800 元/t,去除 20 和 30 mg/L 的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  所需的碳源投加量及费用见表 2。

表 1 最适碳源投配比

Tab. 1 Optimum carbon dosing coefficient

项 目	$\text{NO}_3^- - \text{N}$ 去除量/mg	COD 消耗 量/mg	去除单位 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 所需 COD 量
2017-12-04	10.08	30.1	3.0
	13.89	52.7	3.8
	15.87	55.8	3.5
2017-12-06	2.68	8.7	3.2
2017-12-08	9.70	39.1	4.0
	8.40	49.2	5.9
2017-12-26	3.90	12.0	3.1
2018-01-02	13.70	52.0	3.8
	17.42	44.0	2.5
	14.50	59.0	4.1
	14.60	61.0	4.2
2018-01-08	9.10	25.6	2.8
2018-02-28	2.40	12.0	5.0
	14.00	86.0	6.1
	14.00	95.0	6.8
	9.90	40.2	4.1
2018-03-26	48.00	9.5	5.0
平均值	—	—	4.2

表 2 外加碳源经济分析

Tab. 2 Economic analysis of external carbon source

需要去除的硝态氮/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	20	30
投加系数	3.0~6.8	3.0~6.8
平均投加系数	4.2	4.2
需要投加的碳源量/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	84	126
需要投加的碳源总量/( $\text{t} \cdot \text{d}^{-1}$ )	4.2	6.3
甲醇的 COD 当量值/( $\text{kgCOD} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	1.5	1.5
需投加的甲醇总量/( $\text{t} \cdot \text{d}^{-1}$ )	2.8	4.2
每日外加碳源费用/(元· $\text{d}^{-1}$ )	10 640	15 960
碳源投加成本/(元· $\text{m}^{-3}$ )	0.21	0.315

由表 2 可知,当污水处理量为  $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  时,假设去除 20 mg/L 的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ,则每天需要投加 2.8 t 甲醇,碳源投加成本为 0.21 元/ $\text{m}^3$ ;假设去除 30 mg/L 的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ,则每天需要投加 4.2 t 甲醇,碳源投加成本为 0.315 元/ $\text{m}^3$ 。出于经济成本考虑,对于该污水厂可考虑适当接入食品、酿酒等优质工业废水作为廉价碳源,并在接入前进行可行性分析,以提高进水  $\text{BOD}_5$  浓度,减少外部碳源投加量。

### 3 结论

① 由于上游光伏企业的废水排放等原因,致使污水处理厂进水硝态氮浓度过高,进水碳氮比失衡,出水总氮达标存在风险。

② 通过全流程分析可知,该污水厂实际内回流比约为 200%,并未达到设计值(300%),内回流比不足限制了污水处理厂的脱氮性能,同等条件下,内回流比由 200% 提高到 300%,可以使进水硝态氮最大负荷由 39 mg/L 提高到 48 mg/L。

③ 甲醇的脱氮效果优于乙酸钠,对于该污水厂适宜的甲醇投加系数为 4.2,可为后续优化运行提供基础性数据。此外,建议考虑外接食品、酿酒等具有高  $\text{BOD}_5/\text{TN}$  特征的优质工业废水作为廉价碳源,以确保在出水水质稳定达标的条件下降低运行成本。

### 参考文献:

- [1] Zhang Y T, Lun H B. Research on micro-electrolysis method to treat the copper-containing electroplating wastewater [J]. Adv Mater Res, 2013, 864/867: 1560 - 1563.
- [2] Li Y M, Zou J T, Zhang L L, et al. Aerobic granular sludge for simultaneous accumulation of mineral phosphorus and removal of nitrogen via nitrite in wastewater [J]. Bioresour Technol, 2014, 154(2): 178 - 184.
- [3] 邓志光, 高立军. 对氮化物循环的认识及控制分析 [J]. 给水排水, 2015, 41(3): 157 - 160.  
Deng Zhiguang, Gao Lijun. Analysis on the understanding and control of nitride recycling [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 41(3): 157 - 160 (in Chinese).
- [4] 胡洪营, 赵文玉, 吴乾元. 工业废水污染治理途径与技术研究发展需求 [J]. 环境科学研究, 2010, 23(7): 861 - 868.  
Hu Hongying, Zhao Wenyu, Wu Qianyan. Basic strategies and technology requirements for industrial wastewater pollution control [J]. Research of Environmental Sciences, 2010, 23(7): 861 - 868 (in Chinese).
- [5] 蒋廷弘, 邱丽敏, 汪文生, 等. 北冲污水净化厂  $\text{A}^2/\text{O}$  工艺反硝化效果分析 [J]. 中国给水排水, 2015, 31(8): 116 - 118.  
Jiang Tinghong, Qiu Limin, Wang Wensheng, et al. Analysis of denitrification effect of  $\text{A}^2/\text{O}$  process in Beichong WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(8): 116 - 118 (in Chinese).

(下转第 128 页)