

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.18.019

# 前置预缺氧 $A^2/O+AO$ 工艺全流程测试与应用研究

冀鹏宙<sup>1</sup>, 袁进<sup>1</sup>, 杨志宏<sup>2</sup>, 杨敏<sup>3</sup>, 游佳<sup>3</sup>, 顾森<sup>3</sup>

(1. 太原理工大学 环境科学与工程学院, 山西 太原 030000; 2. 山西正阳污水净化有限公司, 山西 晋中 030600; 3. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074)

**摘要:** 以山西省某城镇污水处理厂前置预缺氧 $A^2/O+AO$ 工艺为研究对象,通过全流程测试评估工艺现状,指导工艺调控,优化脱氮除磷效果,同时实现节能降耗,降低运行成本。基于全流程测试结果,采取调整好氧区曝气模式、增设消氧区、协同调整外回流比及进水配比、降低污泥浓度、调整碳源投加点位等优化措施后,出水TN由13.21 mg/L降至8.74 mg/L,TN去除率由71%提高至79%,对 $PO_4^{3-}-P$ 的去除率由82%提高至98%,该厂生物脱氮除磷效能得到较大提升,同时每月可节省碳源费用14万元,经济效益明显。

**关键词:** 污水处理厂; 工艺优化; 前置预缺氧 $A^2/O+AO$ 工艺; 全流程测试; 脱氮除磷; 节能降耗

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)18-0112-08

## Whole Process Testing and Application of Pre-anoxic $A^2/O$ and AO Process

Ji Peng-zhou<sup>1</sup>, YUAN Jin<sup>1</sup>, YANG Zhi-hong<sup>2</sup>, YANG Min<sup>3</sup>, YOU Jia<sup>3</sup>, GU Miao<sup>3</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030000, China; 2. Shanxi Zhengyang Sewage Purification Co. Ltd., Jinzhong 030600, China; 3. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074, China)

**Abstract:** The  $A^2/O$  and AO process of a municipal wastewater treatment plant (WWTP) in Shanxi Province is studied to evaluate the current status of the process, guide the process regulation and control, optimize the effect of nitrogen and phosphorus removal, save energy and reduce consumption, reduce operating costs at the same time through whole process testing. Based on the results of the whole process test, the effluent TN was reduced from 13.21 mg/L to 8.74 mg/L, the TN removal rate was increased from 71% to 79%, and the  $PO_4^{3-}-P$  removal rate was increased from 82% to 98% after taking the optimization measures such as adjusting the aeration mode of aerobic zone, adding an oxygen elimination zone, adjusting the ratio of external return flow and influent, reducing the sludge concentration, and adjusting the carbon source dosage point. The efficiency of biological nitrogen and phosphorus removal in the WWTP was greatly improved, while the monthly cost of carbon source could be saved by 140 000 yuan, which has an obvious economic benefit.

**Key words:** wastewater treatment plant; process optimization; pre-anoxic  $A^2/O$  and AO process; whole process test; nitrogen and phosphorus removal; energy saving and consumption

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC0408602)

通信作者: 袁进 E-mail: yuan66@vip.sina.com

reducing

全流程测试是基于各类污水处理工艺不同的脱氮除磷功能设计原理,通过对污水处理工艺全过程进行布点、采样、检测、诊断,形成完善的整体性优化运行方案的一项工作。通过全流程测试,可充分了解不同功能区主要污染物的构成,对污染物组分特性进行分析,结合活性污泥性能参数,进行工艺参数调整和运行模式优化<sup>[1]</sup>,充分发挥工艺的脱氮除磷潜力,节约运行成本,提高日常运行的稳定性与调控的精准性。因此可将其作为污水处理厂定期进行工艺评估与诊断的手段<sup>[2]</sup>。

以山西省某污水处理厂为研究对象,该厂前置缺氧A<sup>2</sup>/O+AO工艺日常运行中存在脱氮效果不稳定、生物除磷效果不明显等问题,基于常规检测掌握的进、出水水质组分与生化池脱氮除磷过程变化指标所进行的优化方案效果不明显,难以提出较完善的针对性解决方案。笔者通过全流程测试,充分了解了该厂的运行现状与存在的问题,并提出针对性优化措施:通过调整多点进水的比例,合理优化碳源分配与投加,调整生化池外回流比,优化好氧区曝气状况,平衡各功能区在生物脱氮方面的关系,充分发挥生物除磷潜能,提高工艺整体的脱氮除磷效果及稳定性,并将全流程测试作为该厂定期进行工艺诊断与优化的手段,制定和完善针对性强、操作性好的优化策略,形成高效运行模式,使管理运行更加精细化,提高其脱氮除磷效率<sup>[3]</sup>。

## 1 方法与工艺

### 1.1 污水厂概况

该污水处理厂工艺流程见图1。

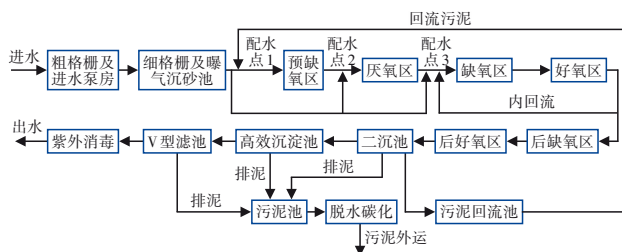


图1 污水处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of wastewater treatment process

前置缺氧A<sup>2</sup>/O+AO工艺污水处理总量为15×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,其预处理包括粗格栅及进水泵房、细格栅及曝气沉砂池,生化处理单元由预缺氧区、厌氧区、

缺氧区、好氧区、后缺氧区、后好氧区6个功能区组成,后接二沉池+高密度沉淀池+V型滤池。污水厂出水水质执行《山西省城镇污水处理厂运行监督管理办法(试行)》规定,在满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准的基础上,COD、NH<sub>3</sub>-N、TP三项指标需达到地表水V类标准。

### 1.2 全流程测试工作内容

① 对该厂至少一年的历史进、出水水质数据进行分析。通过对该厂历年日进、出水数据进行统计分析,掌握氮、磷、有机物等污染物指标的变化规律,研究其进水水质特征与变化规律<sup>[4]</sup>。

② 工艺全流程测试。通过对整个污水处理系统进行全流程布点、取样、检测,分析主要污染物指标在整个生化处理过程中的变化特征<sup>[5]</sup>,通过各功能区的污染物去除情况及沿程变化规律分析其脱氮除磷能力,评价工艺运行中各环节的工况状态。

③ 活性污泥各项功能指标测试。通过烧杯实验进行活性污泥功能测试,对硝化反硝化速率和潜力、厌氧释磷速率和潜力、耗氧速率等功能指标进行测定,判断活性污泥本身的脱氮除磷能力。

④ 对污水处理工艺运行现状进行诊断分析。针对前述测试结果,确定优化关键点,结合污水处理工艺实际情况,改变运行工况,形成针对性的优化运行方案,探索最佳运行工况,并通过后续测试结果验证优化措施的可行性,完善最终的优化方案。

### 1.3 全流程测试方法

全流程测试取样点选在各功能区污水混合较为均匀的物理末端,尽量靠近采样断面的中心,同时取样位置要注意避开泡沫、浮泥、漩涡、内外回流点、药剂投加点、死角、返流等特殊点位,同一取样点应进行3次取样并将水样充分混合。将前一功能区的末端视为下一功能区的前端,通过相邻两取样点的水质指标及相应工况参数来分析该功能区的生化反应情况。

全流程测试水质分析项目中COD、NH<sub>3</sub>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、TN、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P、TP、MLSS和MLVSS采用国家

标准分析方法与快速测定方法相结合进行测定, 行现场测定。  
ORP和DO采用哈希HQ40D便携式水质分析仪进 取样点布置及编号见表1。

表1 全流程测试取样点编号

Tab.1 Sampling point number for the whole process test

编号	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
取样点	沉砂池出水	预缺氧区出水	厌氧区出水	缺氧区1号池出水	缺氧区2号池出水	好氧区一廊道出水	好氧区二廊道出水	好氧区三廊道出水	好氧区四廊道出水	后缺氧区出水	后好氧区出水	污泥回流池出水

## 2 结果与分析

### 2.1 进、出水水质分析

设计进水水质与现行出水水质要求如表2所示。

表2 设计进、出水水质

Tab.2 Design influent and effluent quality

项目	COD/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	BOD <sub>5</sub> / ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	SS/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	TN/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	NH <sub>3</sub> -N/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	TP/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	C/N (BOD <sub>5</sub> /TN)
设计进水水质	500	220	220	62	55	7	3.55
出水水质限值	40	10	10	15	2	0.4	0.67

对2020年4月—2021年3月污水厂进、出水水质进行统计分析,结果见表3。

表3 进、出水水质对比分析

Tab.3 Comparison of influent and effluent quality

项目	COD	BOD <sub>5</sub>	SS	TN	NH <sub>3</sub> -N	TP
进水	范围 269~437 平均值 359.27	范围 99~176 平均值 150.93	范围 163~260 平均值 209.57	范围 47~53 平均值 50.68	范围 38~47 平均值 44.22	范围 4~5.19 平均值 4.87
出水	范围 22~28 平均值 24	范围 2.1~9.5 平均值 4.94	范围 4~9 平均值 6.57	范围 7.6~9.8 平均值 8.73	范围 0.09~0.64 平均值 0.3	范围 0.03~0.15 平均值 0.06

由表3可知,该厂目前进水主要污染物指标未超过设计进水水质,仍在设计处理范围之内,对照表2可知出水水质已能满足排放限值要求。但出水NH<sub>3</sub>-N最高值与最低值相差7倍,波动范围较大;出水NH<sub>3</sub>-N、BOD<sub>5</sub>最高值均出现在冬季,但对出水水质进行分析并未发现二者有直接关联;出水NH<sub>3</sub>-N峰值出现在一年中气温最低的时期,分析是由低温引起的活性污泥硝化速率下降所致;出水SS、COD、BOD<sub>5</sub>峰值出现于一年中好氧区活性污泥膨胀最严

重的时期,分析是由污泥膨胀造成的污泥沉降性变差、出水悬浮物增多、有机物处理能力变弱造成的。进水B/C值为0.36~0.46,均值为0.42,表明进水可生化性较好,C/N(BOD<sub>5</sub>/TN)为2.12~3.30,均值为2.98,较设计进水值偏低,在实际运行中一般B/N>5才能满足脱氮要求。可见该厂进水碳源不足的问题较明显,对缺氧反硝化与厌氧释磷的限制比较大。进水碳源不足是目前污水厂普遍面临的问题,是影响生化池脱氮除磷效果的重要因素<sup>[4]</sup>。

### 2.2 工艺全流程测试情况

对该工艺进行全流程诊断测试,对各单元主要特征指标(DO、ORP、NH<sub>3</sub>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P)进行沿程变化规律分析,判断工艺各功能区的实际运行情况<sup>[6]</sup>。

#### 2.2.1 沿程DO、ORP变化

在生化处理系统中,DO是控制生物脱氮除磷效能的重要指标<sup>[7]</sup>,ORP能够综合其他水质指标来反映污水处理系统的生态环境情况。沿程DO及ORP变化情况如图2所示。

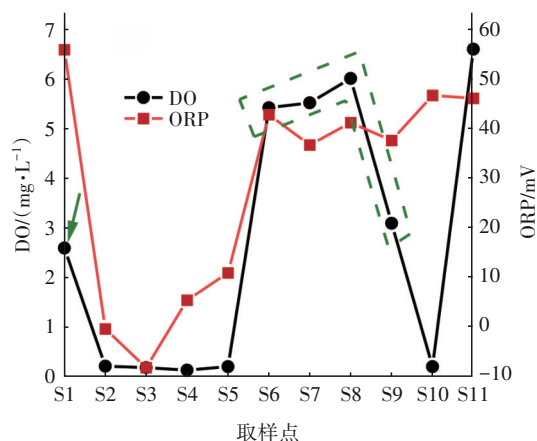


图2 DO及ORP沿程变化情况

Fig.2 Variation of DO and ORP along the process

三期曝气沉砂池出水DO达到2.6 mg/L,会对预缺氧区的缺氧环境造成一定冲击,同时易造成原

水碳源的损耗<sup>[8]</sup>。厌氧区、缺氧区的DO能够基本控制在0.2 mg/L以下,满足厌氧释磷与缺氧反硝化所需的条件。一般来说,厌氧区ORP值宜为-250 mV以下,目前厌氧区ORP均值为-8.1 mV,说明厌氧环境不够充分,对释磷效果会有较大影响;缺氧段、后缺氧区ORP均为正值,表明进水中缺乏还原性有机物<sup>[9]</sup>,反硝化脱氮易受到碳源缺乏的影响。因现状工况MLSS偏高(约6 g/L),曝气系统需维持在较高强度来保证好氧区正常功能,致使好氧区某廊道DO飙升至5.43 mg/L,整个好氧区DO为3.1~6.02 mg/L,一般情况下,好氧区DO应维持在2 mg/L以上,最高不超过3 mg/L,这表明目前好氧区曝气强度过高。在实际运行中,需根据具体进水情况控制DO值,如果进水负荷较低,可适当降低曝气强度。好氧区过量曝气不但会增加耗电量,而且会使回流硝化液DO偏高,从而影响缺氧区内进行的反硝化反应<sup>[10]</sup>。过高的DO也会使后缺氧池大部分池容被消氧过程占用,进而影响其内源反硝化效果。

### 2.2.2 沿程NH<sub>3</sub>-N变化

预处理阶段对NH<sub>3</sub>-N的去除量通常很低,其主要去除过程依靠生化段硝化效果<sup>[11]</sup>。三期生化池沿程NH<sub>3</sub>-N变化情况如图3所示。

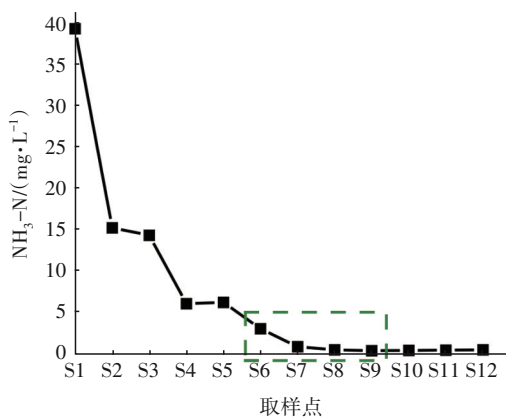


图3 NH<sub>3</sub>-N沿程变化情况

Fig.3 Variation of NH<sub>3</sub>-N along the process

原水NH<sub>3</sub>-N为39.34 mg/L,进入预缺氧区后,NH<sub>3</sub>-N因稀释作用降至15.21 mg/L,在缺氧区NH<sub>3</sub>-N再次降至6 mg/L左右,进入好氧区后,由于DO充足,在硝化作用下NH<sub>3</sub>-N显著降低,至第二廊道末端的NH<sub>3</sub>-N已降至1 mg/L以下,满足出水排放标准(NH<sub>3</sub>-N限值为2 mg/L)。现状工况(MLSS约6 g/L)下好氧区曝气强度偏高,实际池容利用率不超过50%;在生物池MLSS降至3.5 g/L时,核算至好氧区

第三廊道末端NH<sub>3</sub>-N即可降至1 mg/L以下,好氧池的池容利用率不超过75%,池容利用率较低。

### 2.2.3 沿程NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N变化

三期全流程NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N变化情况如图4所示。

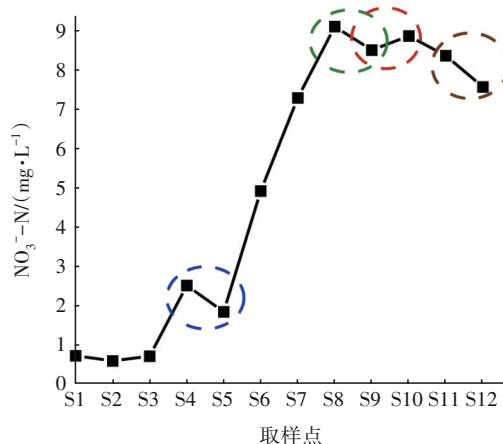


图4 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N沿程变化情况

Fig.4 Variation of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N along the process

缺氧区2号池出水NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N为0.2~5.4 mg/L(平均为1.84 mg/L),表明现状实际混合液在缺氧区的反硝化脱氮并不稳定。对缺氧区进行针对性监测发现:缺氧区NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N浓度变化情况与缺氧区ORP和好氧区末端(内回流点)DO有直接关系,在内回流硝化液DO>1 mg/L时,缺氧区脱氮效果会受到明显影响;目前内回流硝化液DO均值为3.1 mg/L,内回流比约250%,核算内回流DO消耗碳源量约为7.75 mg/L,缺氧区外碳源投加量为86.69 mg/L,约9%的外加碳源被DO直接消耗;理论上1 mg/L的DO对应0.35 mg/L的硝酸盐氮去除量,核算内回流DO导致NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N理论削减量减少约2.7 mg/L。可见内回流硝化液所携带的大量溶解氧是影响缺氧区反硝化的重要因素。在好氧区第四廊道所测得的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N较第三廊道有明显降低,且低于后缺氧区NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N浓度,判断是因本工艺将内回流点设置在后缺氧区起点,受内回流穿墙泵影响,导致后缺氧区、缺氧区混合液返流至好氧区第四廊道末端,这对生化池反硝化脱氮以及好氧区硝化作用造成了影响。观察到的后缺氧区反硝化效果不明显,这是因为原水中碳源已消耗完毕,且目前出水TN已达到排放标准,故无需在后缺氧区投加碳源。此外,还可观察到污泥回流池NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N浓度较后好氧区出水明显降低,这表明活性污泥在二沉池及污泥回流池发生了反硝化反应,证明活性污泥具备一定的内源反硝



化能力,可通过适当延长后缺氧区HRT来满足强化脱氮需求。

#### 2.2.4 沿程 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 变化

三期全流程  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  变化情况如图5所示。

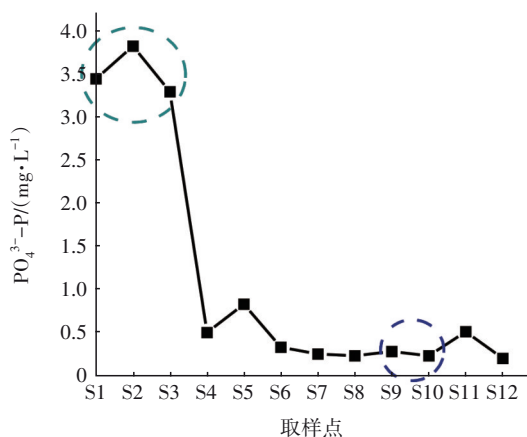


图5  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  沿程变化情况

Fig.5 Variation of  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  along the process

进水中TP/STP/ $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 为1/0.58/0.51,溶解性磷酸盐约占总磷的1/2,其余难溶性总磷将沉积至污泥中去除。由图5可知,生化池进水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 达3.47 mg/L,而在预缺氧区、厌氧区分别为3.89、3.15 mg/L,通过活性污泥功能指标测试证实污泥具备一定的生物除磷和反硝化除磷性能,这表明现状工况下活性污泥在厌氧区中的释磷作用并不稳定。同步分析ORP、 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 等指标发现:厌氧区 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 变化情况与厌氧区ORP有直接关系,厌氧释磷同时受到厌氧环境与生化池整体脱氮效果影响,分析是因为生化池整体脱氮效果波动,污泥外回流携带的 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 整体偏高且浓度不稳定,加上预缺氧区、厌氧区碳源不足导致厌氧区释磷效果波动。受内回流硝化液稀释作用,缺氧区1号池 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 降至0.53 mg/L,在缺氧区2号池观察到一定的释磷现象,可证实现状工况下反硝化除磷作用未充分利用。通过好氧吸磷与微生物同化作用, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 在好氧区持续降至0.32 mg/L,同时在后缺氧区可观察到一定的反硝化除磷现象。生化池出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 为0.25 mg/L,最终经高效沉淀池加药处理后,清水池中出水TP降至0.18 mg/L, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 降至0.08 mg/L,可达到排放标准。

### 2.3 活性污泥功能指标测试

#### 2.3.1 测试方案

对生化池各功能区活性污泥取样进行烧杯实

验,测定活性污泥的硝化速率、反硝化速率、厌氧释磷特性等功能指标,分析活性污泥的脱氮除磷能力,结合生物系统的实际HRT等指标核算各功能区的运行效果及潜力。

#### 2.3.2 测试结果

##### ① 硝化速率

一般情况下,好氧区活性污泥硝化速率为2~6  $\text{mg}/(\text{g}\cdot\text{h})^{[10]}$ ,经烧杯实验测得该厂活性污泥硝化速率为4.29  $\text{mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$ ,处在正常范围内,表明好氧区活性污泥硝化能力良好。经核算,好氧区理论状态下 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除量可达138 mg/L,实际进水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 最高为57 mg/L,理论上在好氧区第二廊道即可完全去除,这也与全流程测试结果相符。

##### ② 反硝化速率

取缺氧区活性污泥进行小试,测定该厂活性污泥反硝化速率以了解其活性污泥的反硝化能力<sup>[12]</sup>,结果见表4。

表4 活性污泥反硝化速率测定结果

Tab.4 Measurement results of activated sludge denitrification rate and denitrification potential

项目	斜率/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ )	反硝化速 率及潜力/ ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ )	反应 时间/h	MLSS/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	MLVSS/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	MLVSS: MLSS/%
反硝化 速率	第一段	0.220 0	2	7 044	3 598	51.07
	第二段	0.012 3				

由表4可知,在120 min反应时间内,反硝化速率分为2段:第一段活性污泥利用原水中易降解的快碳源进行反硝化脱氮,反硝化速率为3.660  $\text{mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$ ;第二段为利用原水中的缓释碳源进行反硝化反应,反硝化速率明显降低,为0.205  $\text{mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$ ,而理论上,当反硝化速率达到3~5  $\text{mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$ 时,才能达到较好的脱氮效果<sup>[13]</sup>。综上,该厂活性污泥反硝化速率处于正常范围内,能够满足正常生物脱氮要求,但仍有较大提升空间。

##### ③ 厌氧释磷速率

活性污泥厌氧释磷速率分析<sup>[14]</sup>结果见表5。

表5 活性污泥释磷速率及潜力

Tab.5 Activated sludge phosphorus release rate and phosphorus release potential

项目	斜率/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ )	厌氧释磷速 率及潜力/ ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ )	反应 时间/h	MLSS/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	MLVSS/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	MLVSS: MLSS/%
释磷 速率	0.152 8	2.68	1	6 344	3 421	53.92

由表5可知,该厂活性污泥厌氧释磷速率为2.68 mg/(g·h),一般城镇生活污水处理厂活性污泥厌氧释磷速率为4~8 mg/(g·h),这表明该厂活性污泥生物除磷功能受限,结合全流程测试分析,应营造良好的厌氧释磷环境,充分发挥生物除磷能力。

### 3 优化运行建议与措施

针对全流程测试结果,结合工艺特点协同调整工艺运行参数:

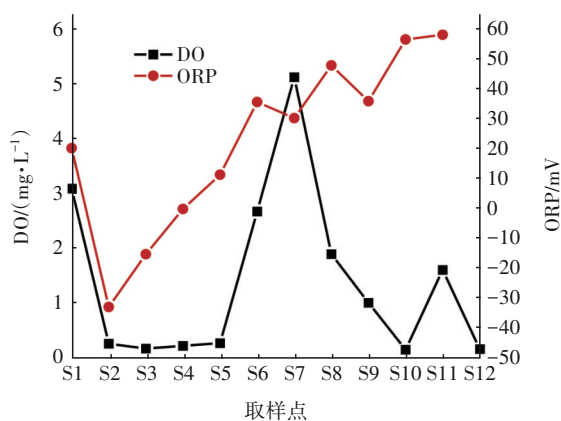
① 逐步降低污泥浓度,将生化池MLSS分阶段由6 g/L逐步降至3.5 g/L;降低好氧区曝气强度,将第四廊道进行消氧处理,减少高浓度溶解氧对缺氧环境的冲击,提高好氧区的池容利用率,降低能耗。

② 建议将碳源投加点位置后移,避开内回流点,提高碳源利用率,进一步增强缺氧区反硝化效果。

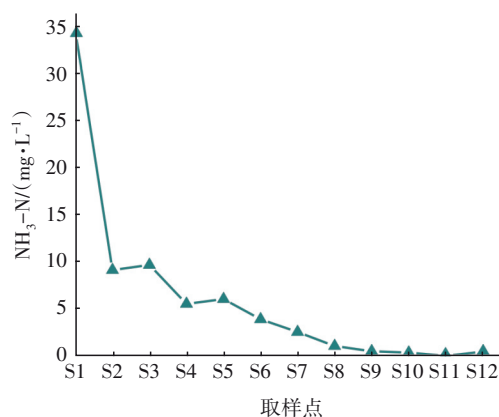
③ 协同调整进水配比与污泥回流比:将预缺氧区进水配比由15%提高至30%;将外回流比由100%降低至85%。通过为预缺氧区提供充足碳源保证其对回流污泥的反硝化效果,降低回流污泥对厌氧环境的冲击,提高厌氧区释磷效果,充分发挥生物除磷能力;降低外回流比还能够减少回流污泥NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N浓度波动对厌氧环境的影响,维持工艺运行稳定。

### 4 优化运行结果

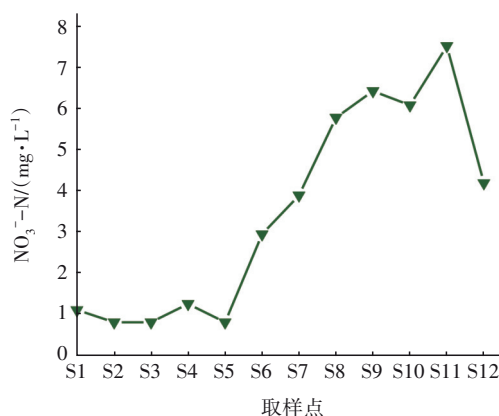
经过全流程测试,稳定运行后进行了跟踪监测,以DO、ORP、NH<sub>3</sub>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P等指标的全流程变化来对优化后的工况进行评价,进一步挖掘可优化空间<sup>[15]</sup>。工艺优化后跟踪监测结果见图6。



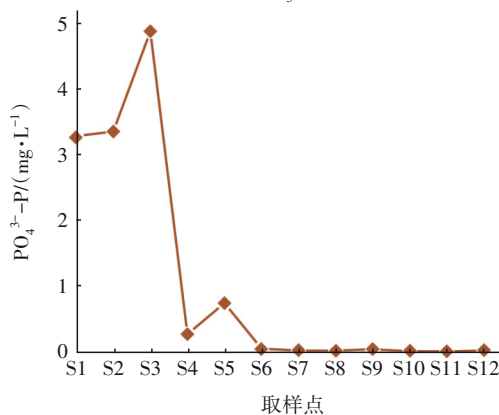
a. 优化后DO、ORP沿程变化



b. 优化后NH<sub>3</sub>-N沿程变化



c. 优化后NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N沿程变化



d. 优化后PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P沿程变化

图6 优化后DO、ORP、NH<sub>3</sub>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P沿程变化  
Fig.6 Variation of DO、ORP、NH<sub>3</sub>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P along the process after optimization

由DO、ORP指标可见,相关功能区厌氧、缺氧环境得到明显改善;好氧区硝化能力稳定,出水NH<sub>3</sub>-N为0.45 mg/L,依然能够保证达标;预缺氧区与缺氧区的反硝化效果良好,缺氧池末端NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N降至0.8 mg/L,生化池出水NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N为7.55 mg/L,较优化前明显降低;同时厌氧区释磷效果明显增强,良

好的释磷效果保证了好氧区的生物除磷能力,生化池出水  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  为 0.05 mg/L,能够确保出水稳定达标。

通过对出水水质进行核算发现<sup>[9]</sup>:全流程测试优化后出水 TN 由 13.21 mg/L 降至 8.74 mg/L, TN 去除率由 71% 提高至 79%,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  去除率由 82% 提高至 98%。对各功能区脱氮效能进行核算发现:全流程测试优化后预缺氧区  $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$  去除率维持在 79.22%~90.99%,脱氮效果良好;缺氧区  $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$  去除量由 17.49 mg/L 提高至 21.01 mg/L,其脱氮贡献较优化前提高 10.03%;后缺氧区受碳源限制,  $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$  去除量、去除率变化不大。三个主要脱氮功能区的脱氮稳定性较优化前都有明显提升。

实施好氧区曝气量优化调控+消氧区策略后,内回流硝化液 DO 均值由优化前的 3.1 mg/L 降至 1 mg/L,结合内回流比 250%,缺氧区节省碳源 5 mg/L;后缺氧区脱氮量增加 0.71 mg/L,利用内碳源反硝化脱氮节省碳源 2.03 mg/L 以上,该工艺处理规模为  $15\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ,外加碳源为乙酸钠(COD 当量为 0.68 kgCOD/kg),共节省乙酸钠 1 551 kg/d,按乙酸钠价格为 3 000 元/t 核算,共节省碳源费用 14 万元/月,经济效益明显。

## 5 结论与建议

① 通过全流程测试,发现该厂前置缺氧  $\text{A}^2/\text{O}+\text{AO}$  工艺好氧区曝气过度,好氧区池容利用率偏低,内回流点位于后缺氧区起点,与碳源投加点距离过近,导致碳源被内回流携带的 DO 大量消耗,对缺氧区、后缺氧区的缺氧环境造成冲击,因此生化池整体反硝化脱氮受到影响、厌氧区释磷效能受限,各单元运行效果不稳定,脱氮除磷效能波动。

② 针对发现的问题,对工艺运行提出优化措施与建议:降低曝气强度,将好氧区第四廊道改为消氧处理;后移碳源投加点;协同调整外回流比与进水配比。优化后,生化池脱氮效果得到改善,并且厌氧区生物释磷能力显著增强:出水 TN 由 13.21 mg/L 降至 8.74 mg/L; TN 去除率由 71% 提高至 79%;  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  去除率由 82% 提高至 98%。主要脱氮功能区的脱氮稳定性较优化前都有明显提升:预缺氧区  $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$  去除率保持良好;缺氧区  $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$  去除量由 17.49 mg/L 提高至 21.01 mg/L,其脱氮贡献较优化前提高了 10.03%。此外,日常运行可节省

乙酸钠 1 551 kg/d,减少碳源支出 14 万元/月。

③ 在二沉池及回流污泥池中发生的内源反硝化也是生物脱氮的重要组成部分。在保证生化系统高效运行的条件下,如何将这部分 TN 去除量纳入生化池脱氮单元,提高其可控性,是之后实际运行调控需要关注的问题。

④ 通过全流程测试能够发现污水厂运行过程中存在的问题及生物脱氮除磷方面的薄弱环节,根据结果可采取针对性的调控措施,提高日常管理运行效率,在确保出水稳定达标的同时,还可降低污水厂日常药耗与能耗。因各厂进水水质水量及活性污泥功能的差异,全流程测试可作为污水处理厂定期进行工艺评估诊断的手段,通过制定针对性强、操作性好的优化策略,使管理运行更加精细化。

## 参考文献:

- [1] 刘文如,顾广发,宋小康,等.不同溶解氧浓度下硝化工艺中微生物种群结构对比[J].环境科学,2019,40(8):3706-3712.  
LIU Wenru, GU Guangfa, SONG Xiaokang, et al. Comparison of the microbial community structure in nitrifying processes operating with different dissolved oxygen concentrations [J]. Environmental Science, 2019, 40(8): 3706-3712(in Chinese).
- [2] RAJAEI M, NAZIF S. Improving wastewater treatment plant performance based on effluent quality, operational costs, and reliability using control strategies for water and sludge lines[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 167: 398-411.
- [3] 李怀波,郑凯凯,王燕,等.基于全流程分析的低碳氮比进水污水处理厂运行调控[J].环境工程,2021,39(3):97-102,135.  
LI Huaibo, ZHENG Kaikai, WANG Yan, et al. Operation regulation of wastewater treatment plant with low carbon-to-nitrogen ratio influent based on whole process analysis method [J]. Environmental Engineering, 2021, 39(3): 97-102, 135(in Chinese).
- [4] 张玲玲,陈立,郭兴芳,等.南北方污水处理厂进水水质特性分析[J].给水排水,2012,38(1):45-49.  
ZHANG Lingling, CHEN Li, GUO Xingfang, et al. Analysis on the feed water quality characteristics of the wastewater treatment plants in south China and north China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2012, 38(1): 45-49(in Chinese).

- [5] 高兴东,孙艳峰,谭周亮,等. 城市污水处理厂工艺流程脱氮除磷效果诊断及优化[J]. 绵阳师范学院学报, 2018, 37(5): 35-41.  
GAO Xingdong, SUN Yanfeng, TAN Zhouliang, *et al.* Problem diagnosis for nitrogen removal at a WWTP [J]. Journal of Mianyang Teachers' College, 2018, 37(5): 35-41(in Chinese).
- [6] 卢汉清,张莺,沈浩,等. 宁波市基于污水厂工艺全流程分析及优化运行模式的实践[J]. 中国给水排水, 2019, 35(14): 24-31.  
LU Hanqing, ZHANG Ying, SHEN Hao, *et al.* Practice on whole process analysis and optimized operation mode of sewage treatment plants in Ningbo [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(14): 24-31(in Chinese).
- [7] 陈明飞,郑凯凯,王燕,等. 基于全流程分析的污水厂高硝态氮进水优化运行[J]. 中国给水排水, 2019, 35(17): 118-122, 128.  
CHEN Mingfei, ZHENG Kaikai, WANG Yan, *et al.* Optimized operation of a wastewater treatment plant with high nitrate nitrogen concentration influent based on whole process analysis method [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(17): 118-122, 128 (in Chinese).
- [8] 张芸蓓,马民,宫玲,等. A/A/O污水处理工艺脱氮效果模拟及优化[J]. 中国给水排水, 2022, 38(1): 88-94.  
ZHANG Yunbei, MA Min, GONG Ling, *et al.* Simulation of denitrification of A/A/O process and its optimization [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(1): 88-94 (in Chinese).
- [9] 李鹏峰,郑兴灿,孙永利,等. 城镇污水处理厂系统化精准诊断技术方法构建及应用[J]. 中国给水排水, 2021, 37(12): 1-6, 13.  
LI Pengfeng, ZHENG Xingcan, SUN Yongli, *et al.* Construction and application of systematic and accurate diagnosis technology for urban WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(12): 1-6, 13(in Chinese).
- [10] 李激,王燕,罗国兵,等. 城镇污水处理厂一级A标准运行评估与再提标重难点分析[J]. 环境工程, 2020, 38(7): 1-12.  
LI Ji, WANG Yan, LUO Guobing, *et al.* Operation evaluation of urban sewage treatment plants implementing grade I -A standard and analysis on emphasis and difficulties in upgrading the standard [J]. Environmental Engineering, 2020, 38(7): 1-12 (in Chinese).
- [11] 王怡文,黄天寅,曹强,等. 苏州某污水处理厂全流程分析及优化运行研究[J]. 工业水处理, 2021, 41(11): 146-150.  
WANG Yiwen, HUANG Tianyin, CAO Qiang, *et al.* Whole process analysis and optimized operation of a sewage treatment plant in Suzhou [J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(11): 146-150(in Chinese).
- [12] 吴代顺,方燕蓝. 氧化沟工艺污水处理厂的活性污泥特性分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(11): 109-113.  
WU Daishun, FANG Yanlan. Characteristic analysis on activated sludge in a wastewater treatment plant with oxidation ditch process [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(11): 109-113(in Chinese).
- [13] 马娟,宋相蕊,李璐. 碳源对反硝化过程NO<sub>2</sub><sup>-</sup>积累及出水pH值的影响[J]. 中国环境科学, 2014, 34(10): 2556-2561.  
MA Juan, SONG Xiangrui, LI Lu. Effect of carbon source on nitrite accumulation and pH value of effluent during denitrification process [J]. China Environmental Science, 2014, 34(10): 2556-2561(in Chinese).
- [14] 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).
- [15] 陈亚松. 综合污水处理厂深度脱氮的优化运行与微生态机理研究[D]. 南京:南京大学, 2019.  
CHEN Yasong. Operation Optimization and Microecological Mechanism for Further Enhancing Nitrogen Removal in Integrated Wastewater Treatment Plant [D]. Nanjing: Nanjing University, 2019 (in Chinese).

作者简介:冀鹏宙(1997- ),男,山西朔州人,硕士研究生在读,主要研究方向为污水处理。

E-mail:957209501@qq.com

收稿日期:2022-11-24

修回日期:2023-03-09

(编辑:衣春敏)