

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.21.009

改良型A²/O+A/O工艺的脱氮诊断和优化调控策略

陈亚松¹, 赵 铮²

(1. 中国长江三峡集团有限公司 长江生态环境工程研究中心, 北京 100038; 2. 三峡生态环境有限公司, 湖北 宜昌 443000)

摘 要: 针对污水处理厂日趋严格的总氮排放要求,以某综合污水处理厂A²/O+A/O工艺为研究对象,开展了全过程的脱氮诊断分析。结果表明,缺氧区和前缺氧区是脱氮的主要区域,两者在不同月份的脱氮贡献占比分别为55.7%~60.8%、19.4%~28.5%;缺氧区的反硝化反应不稳定,其出水NO₃⁻-N>1.6 mg/L的比例高达35.5%;后缺氧区对NO₃⁻-N的去除率仅为13.9%。结合长期运行数据的诊断分析,建立了出水总氮的控制方程式,脱氮的关键控制因子为内外回流比、缺氧区出水NO₃⁻-N浓度和后缺氧区对NO₃⁻-N的去除量,通过工艺优化调控可实现该污水厂出水总氮<6 mg/L。

关键词: A²/O+A/O工艺; 脱氮; 优化调控; 控制因子; 污水处理厂

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)21-0064-08

Diagnosis of Nitrogen Removal in Modified A²/O+A/O Process and Its Optimization Strategy

CHEN Ya-song¹, ZHAO Zheng²

(1. Yangtze River Eco-Environmental Engineering Research Center, China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China; 2. Three Gorges Ecological Environment Co. Ltd., Yichang 443000, China)

Abstract: In view of the increasingly stringent requirements of total nitrogen discharge in wastewater treatment plants, the nitrogen removal of an A²/O+A/O process was diagnosed and analyzed in a comprehensive wastewater treatment plant. Anoxic zone and pre-anoxic zone were the main areas of nitrogen removal, which contributed 55.7%~60.8% and 19.4%~28.5% of the nitrogen removal respectively in different periods. Denitrification in the anoxic zone was unstable, and the effluent NO₃⁻-N was greater than 1.6 mg/L with a frequency as high as 35.5%. The actual removal rate of NO₃⁻-N in the post-anoxic zone was only 13.9%. A control equation for total nitrogen removal was established based on the diagnosis and analysis of long-term operational data. The key control factors affecting nitrogen removal were internal and external reflux ratio, effluent NO₃⁻-N concentration of the anoxic zone and the removal amount of NO₃⁻-N in the post-anoxic zone. The total nitrogen in effluent from the wastewater treatment plant could be less than 6 mg/L after process optimization.

Key words: A²/O+A/O process; nitrogen removal; optimal regulation; control factor; wastewater treatment plant

随着更加严格排放标准的颁布和实施,许多污水处理厂都面临着提标改造,目前的提标改造中主流采用三级生物脱氮处理设施,如反硝化滤池、深床滤池等进行强化脱氮^[1-2],大幅增加了投资及运行成本。事实上,大多数已运行的A²/O工艺并未充分发挥其脱氮潜力^[3],脱氮效果不仅与工艺类型有关,还与运行工况密不可分。通过对运行工况和参数的优化调整,如水力停留时间(HRT)、硝化液回流比、碳源投加等,通常可改善和提高脱氮效果^[4-5]。笔者基于A²/O工艺开发了A²/O+A/O的双缺氧强化脱氮工艺^[6],并已应用于某综合污水处理厂。以该综合污水处理厂为研究对象,结合长期连续的大量过程检测数据和运行参数,对综合污水处理厂全流程进行诊断分析,识别运行中脱氮存在的问题和潜力空间,并基于大量运行数据的相关性和统计分析,提出工艺运行的优化和控制策略,以期用于指导运行过程。

1 材料和方法

1.1 综合污水处理厂强化脱氮工艺

某综合污水处理厂规模为 $7.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,生化处理单元分3组平行并联运行,采用A²/O+A/O的双缺氧脱氮工艺,总HRT为21.5 h,每组生化池由前缺氧区(PRAN, HRT=1 h)、厌氧区(ANA, HRT=1.5 h)、缺氧区(AN, HRT=5.6 h)、好氧区(AE, HRT=11 h)、后缺氧区(POAN, HRT=1.8 h)、后好氧区(POAE, HRT=0.6 h)6个单元组成。相比传统A²/O工艺,本工艺在厌氧区之前增加了前缺氧区,用于回流污泥的反硝化;在好氧区后又增设了后缺氧区和后好氧区,主要用于对未能回流的硝化液进行反硝化脱氮。在前缺氧区和缺氧区多点分配进水,硝化液回流至缺氧区可分别在前端、中部进行多点回流,后缺氧单元设计了碳源投加系统,用于补充反硝化碳源。生化处理工艺流程见图1。

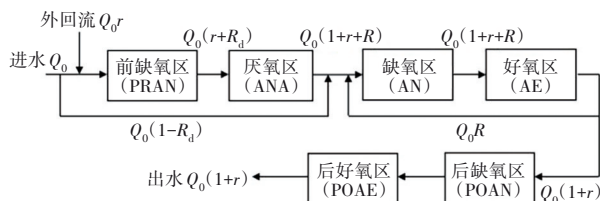


图1 某综合污水处理厂生化处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of biochemical process in a comprehensive wastewater treatment plant

1.2 脱氮贡献的计算方法

该污水厂生化处理工艺全流程的水量平衡见图1。其中, Q_0 为进水流量, m^3/d ; R 为内回流比(硝化液回流量与进水流量的比值); r 为外回流比(回流污泥流量与进水流量的比值); R_d 为进水分配比例(分配至前缺氧区的进水流量与总进水流量的比值)。各反应单元对 NO_3^- -N的去除率 η 以及对整个系统的脱氮贡献率 φ 的计算方法如下:

前缺氧区:

$$\eta_{\text{PA}} \approx \frac{rC_r - (R_d + r)C_{\text{PA}}}{rC_r} \quad (1)$$

$$\varphi_{\text{PA}} = \frac{rC_r - (R_d + r)C_{\text{PA}}}{C_{\text{TN}} - C_{\text{TN2}}} \quad (2)$$

厌氧区:

$$\eta_{\text{A}} = \frac{C_{\text{PA}} - C_{\text{A}}}{C_{\text{PA}}} \quad (3)$$

$$\varphi_{\text{A}} = \frac{C_{\text{PA}} - C_{\text{A}}}{C_{\text{TN}} - C_{\text{TN2}}} \quad (4)$$

缺氧区:

$$\eta_{\text{AN}} \approx \frac{(R_d + r)C_{\text{A}} + RC_{\text{R}} - (1 + R + r)C_{\text{AN}}}{(R_d + r)C_{\text{A}} + RC_{\text{R}}} \quad (5)$$

$$\varphi_{\text{AN}} = \frac{(R_d + r)C_{\text{A}} + RC_{\text{R}} - (1 + R + r)C_{\text{AN}}}{C_{\text{TN}} - C_{\text{TN2}}} \quad (6)$$

后缺氧区:

$$\eta_{\text{POA}} = \frac{C_{\text{R}} - C_{\text{POA}}}{C_{\text{R}}} \quad (7)$$

$$\varphi_{\text{POA}} = \frac{C_{\text{R}} - C_{\text{POA}}}{C_{\text{TN}} - C_{\text{TN2}}} \quad (8)$$

式中: C_{R} 为内回流 NO_3^- -N浓度,即好氧区出水 NO_3^- -N浓度, mg/L ; C_r 为外回流 NO_3^- -N浓度, mg/L ; C_{TN} 、 C_{TN2} 分别为进水和出水TN浓度, mg/L ; C_{PA} 、 C_{A} 、 C_{AN} 、 C_{POA} 分别表示前缺氧区、厌氧区、缺氧区、后缺氧区出水 NO_3^- -N浓度, mg/L 。进水中的 NO_3^- -N浓度忽略不计。

1.3 水质检测分析方法

COD、BOD₅、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、TN等常规水质指标均采用国家标准方法进行检测分析。

2 结果与分析

2.1 综合污水处理厂的总体脱氮效果

综合污水处理厂进水COD和BOD₅平均浓度分别为264.4、96.9 mg/L , B/C平均值为0.37。围绕脱氮过程的硝化和反硝化反应,分析了污水厂长期(18个月)运行过程中的 NH_4^+ -N和TN去除效果,见

图2。从图2(a)可知,综合污水处理厂对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果很好,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均浓度为0.3 mg/L,其中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ <1 mg/L的天数占99.7%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均去除率达到了99%。从图2(b)可知,进水TN浓度在旱季(11月—次年5月)的平均值为40.8 mg/L,明显高于雨季(6月—10月)的平均值25.5 mg/L,出水TN浓度整体呈现波动变化,平均浓度为7.9 mg/L,平均去除率为77.1%。故生化系统的硝化反应彻底且稳定,硝化反应不是该污水厂脱氮的限制因素; $\text{A}^2\text{O}+\text{A/O}$ 工艺具有更高的TN去除率,明显优于传统 A^2O 工艺的65%~70%^[7-8]。

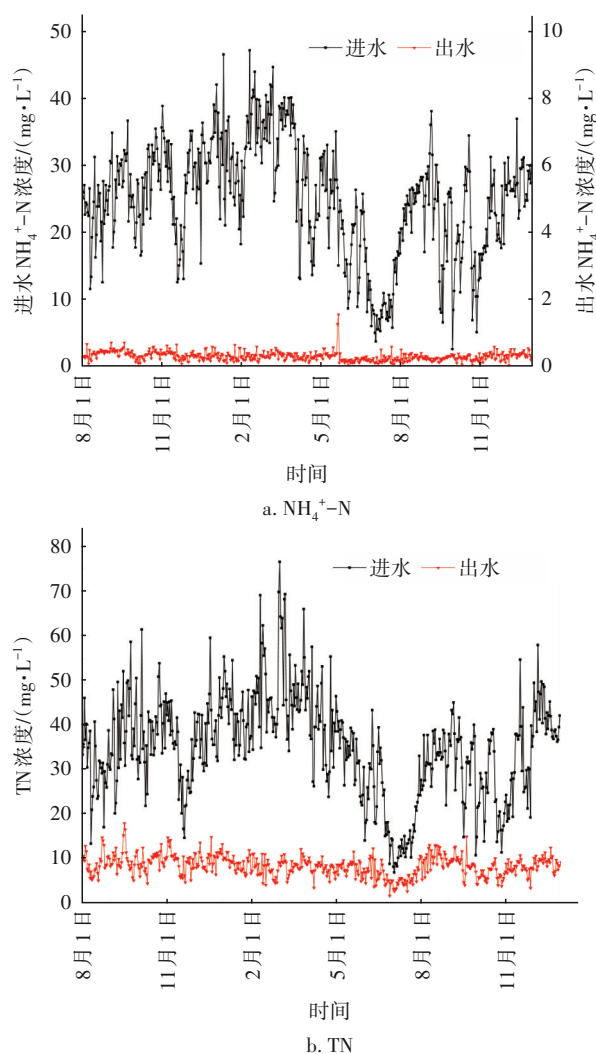


图2 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN的去除效果

Fig.2 Removal effect of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TN

尽管综合污水处理厂已取得了较高的脱氮效率,但不同时间其脱氮效率波动较大,工艺运行仍存在优化和调控空间。图3统计了TN的月平均去

除率,2月—4月TN去除率超过80%,特别是2月份进水TN平均浓度高达46.3 mg/L,出水平均浓度为7.48 mg/L,TN平均去除率高达83.9%,远超过传统 A^2O 工艺的脱氮率。生物脱氮过程受到诸多因素的影响,外界变量如进水浓度、流量、碳源、温度等都会直接影响到脱氮效率,内在的工艺运行参数如回流比、污泥浓度(MLSS)、溶解氧等需要根据外界条件的变化及时调整,这也解释了TN去除率波动的原因。因此,长期运行实践证明, $\text{A}^2\text{O}+\text{A/O}$ 工艺具有高的脱氮潜力,通过工艺的优化运行可充分挖掘和发挥脱氮效率。

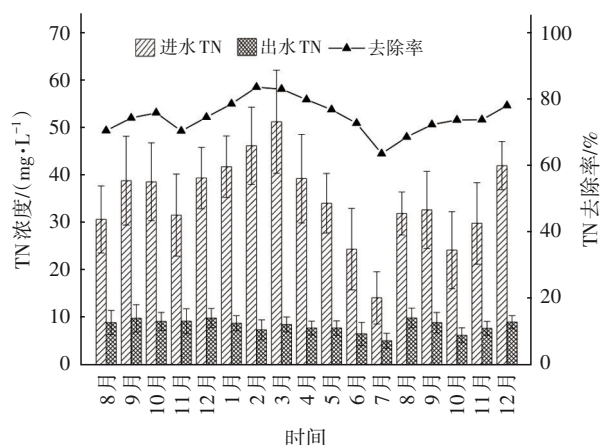


图3 TN月平均浓度和去除率

Fig.3 Monthly average concentration and removal rate of TN

2.2 全流程不同单元的脱氮诊断和分析

在 $\text{A}^2\text{O}+\text{A/O}$ 双缺氧脱氮工艺中,TN的去除途径主要为缺氧反硝化脱氮,好氧区由于微生物同化作用对TN的去除贡献很低,这与国内外的研究结果一致^[9]。理论上,反硝化脱氮的单元主要包括前缺氧区、厌氧区、缺氧区和后缺氧区,对以上脱氮单元分别进行了诊断和分析。

2.2.1 前缺氧区和厌氧区的脱氮诊断和分析

前缺氧区的主要作用是去除回流污泥中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,因为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 会抑制聚磷菌释磷。厌氧区的主要作用是聚磷菌释磷提供厌氧环境,为好氧除磷提供所需要的聚羟基丁酸酯(PHB)。前缺氧区出水进入厌氧区,当前缺氧区反硝化不彻底时,通常会有残留的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 进入到厌氧区,为厌氧区发生 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的反硝化提供了条件。回流污泥、前缺氧区和厌氧区的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度如图4所示。回流污泥中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度变化较大,基本在2~12 mg/L,平均为

6.0 mg/L,这与生化池出水 NO_3^- -N直接相关。前缺氧区出水 NO_3^- -N也存在一定波动(0~4.7 mg/L),平均浓度为0.55 mg/L,这表明前缺氧区总体的反硝化效果显著, NO_3^- -N实际去除率为90.8%。尽管如此,出水 NO_3^- -N浓度的波动也暴露出前缺氧区反硝化效果不稳定,在部分时段反硝化效率较低。经统计分析,前缺氧区出水 NO_3^- -N>1.0 mg/L的累积频率占14.3%,因此可通过优化运行进一步降低其浓度,以更好地保证后续的厌氧释磷效果。

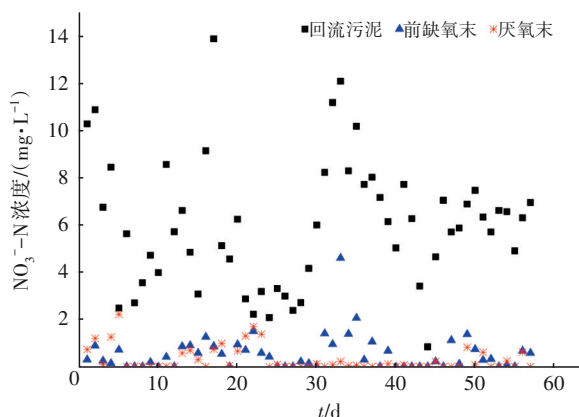


图4 前缺氧区和厌氧区的 NO_3^- -N浓度

Fig.4 NO_3^- -N concentration of pre-anoxic zone and anaerobic zone

厌氧区出水 NO_3^- -N浓度相对较稳定,在0~1.5 mg/L之间,平均浓度仅为0.33 mg/L,其中低于1.0 mg/L的占比为87.7%,充分说明了反硝化较彻底。因此,通过前缺氧区和厌氧区的处理,回流污泥中的 NO_3^- -N基本被完全去除,前缺氧区和厌氧区不是影响系统脱氮的限制环节。

2.2.2 缺氧区的脱氮诊断和分析

缺氧区对回流硝化液中的 NO_3^- -N进行反硝化脱氮,是传统A²/O工艺脱氮的最核心途径。图5为回流硝化液及缺氧区出水的 NO_3^- -N浓度。在全年共检测了143 d的数据,回流硝化液和缺氧区出水的 NO_3^- -N平均浓度分别为7.41、1.37 mg/L,回流硝化液中的 NO_3^- -N大部分得到了有效去除。尽管如此,缺氧区出水 NO_3^- -N浓度在不同时段的波动仍较大(0~5.38 mg/L),7月—8月浓度相对较高,而在9月—12月浓度相对较低(<1 mg/L),1月—2月浓度不稳定。故可借鉴已有实践经验和运行参数,通过工艺优化和调控,解决某些月份缺氧区出水 NO_3^- -N浓度偏高或不稳定的问题^[10]。

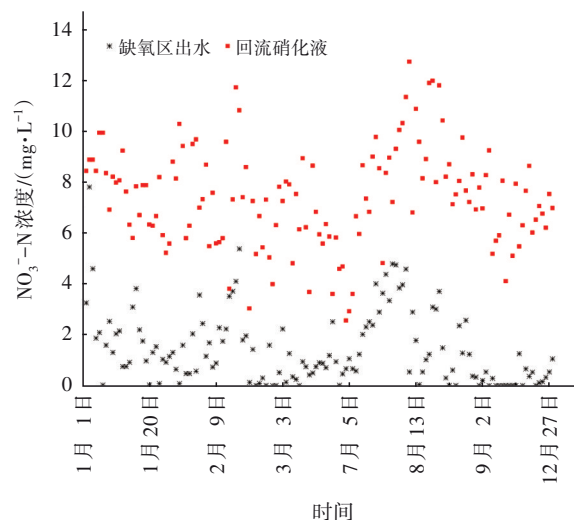


图5 回流硝化液及缺氧区出水中的 NO_3^- -N浓度

Fig.5 NO_3^- -N concentration of nitrification mixture and effluent in anoxic zone

对这143 d的缺氧区出水 NO_3^- -N浓度的分布频率进行统计, NO_3^- -N<0.8 mg/L的占比达到44.7%,表明在这些时间内缺氧区的反硝化作用较好,优于传统A²/O工艺,这也解释了该综合污水处理厂具有良好脱氮效果的原因。而 NO_3^- -N>1.6 mg/L的占比也达到35.5%,说明在这些时间内缺氧区的反硝化并不完全,需要通过运行优化调控来改善和提高脱氮效率。

2.2.3 后缺氧区的脱氮诊断和分析

A²/O+A/O工艺的后缺氧设计理论上解决了传统A²/O工艺通过回流硝化液进行反硝化脱氮的瓶颈,未能回流的 NO_3^- -N以及缺氧区未彻底反硝化的 NO_3^- -N可在后缺氧区进一步反硝化去除。后缺氧区对 NO_3^- -N的去除效果见图6。

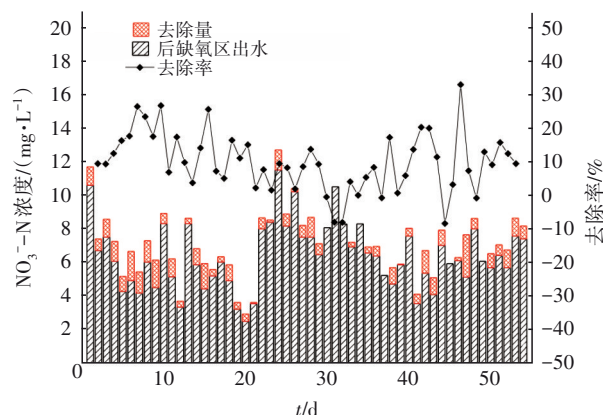


图6 后缺氧区对 NO_3^- -N的去除效果

Fig.6 Removal of NO_3^- -N in post-anoxic zone

由图6可知,后缺氧区对好氧区出水的 NO_3^- -N有不同程度地去除,平均去除量在 1.0 mg/L 左右,平均去除率为 13.9% ,出水 NO_3^- -N平均浓度为 6.3 mg/L 。后缺氧区对系统脱氮具有一定的贡献,但由于综合污水处理厂的出水水质已满足排放标准要求,实际运行中未按原设计在后缺氧区补充碳源,导致后缺氧区反硝化不充分, NO_3^- -N仍未能完全去除。因此,综合污水处理厂可根据排放标准要求,控制后缺氧区的运行。

2.3 不同时期各单元的脱氮贡献分析

为了分析评价不同处理单元对TN的去除量和脱氮贡献,针对上述分析中不同月份脱氮效果的差异,选择2月、8月和11月,分别对全流程过程数据监测分析两周,取平均值计算TN去除量和脱氮贡献,结果如图7所示。

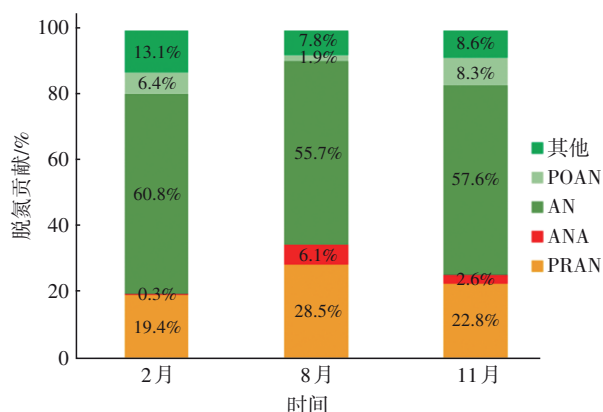


图7 3个月份各单元的脱氮贡献

Fig.7 TN removal proportion in different units during three months

试验期间,2月、8月和11月这3个月份对TN的平均去除率分别为 83.3% 、 70.8% 和 74.0% ,主要运行参数见表1。缺氧区依然是脱氮的主要场所,3个时期的脱氮贡献占比为 55.7% ~ 60.8% ,其次是前缺氧区,其脱氮贡献占比为 19.4% ~ 28.5% 。这与工艺设计原理保持一致。缺氧区和前缺氧区的脱氮贡献大小主要与内、外回流比以及出水 NO_3^- -N浓度直接相关。2月份的进水TN浓度最高,缺氧区的脱氮贡献占比为 60.8% ,不论是TN去除量还是脱氮贡献均显著高于其他月份,这主要与其高内回流比(360%)、低出水 NO_3^- -N浓度(0.85 mg/L)有关,说明大量回流的 NO_3^- -N在缺氧区中反硝化相对完全。对于前缺氧区,在8月份的脱氮贡献占比最高(28.5%),主要是其高外回流比(100%)所致,但可

能由于其进水分碳源不足,导致前缺氧区的反硝化并不彻底(出水 NO_3^- -N浓度为 1.45 mg/L),残留的 NO_3^- -N进入厌氧区继续进行反硝化。

表1 3个月份的主要运行参数

Tab.1 Main operating parameters during three months

项目	TN/(mg·L ⁻¹)		NO ₃ ⁻ -N/(mg·L ⁻¹)			内回流比/%	外回流比/%	MLSS/(mg·L ⁻¹)
	进水	出水	前缺氧区出水	厌氧区出水	缺氧区出水			
2月	43.6	7.3	0.14	0.05	0.85	360	100	4 360
8月	33.7	9.8	1.45	0.32	1.49	200	100	2 660
11月	36.6	9.5	1.03	0.64	1.43	230	70	3 370

厌氧区的脱氮贡献较小,这与前缺氧区出水 NO_3^- -N浓度有关。后缺氧区的脱氮贡献也较小,其主要原因是污水进入后缺氧区时几乎耗尽了碳源,在后缺氧区反硝化过程主要依赖活性污泥内碳源。除了反硝化脱氮之外,3个月份通过其他途径去除的TN占比为 7.8% ~ 13.1% ,去除途径主要是微生物同化作用。

为了进一步分析和挖掘各单元的潜在脱氮空间,对比了不同时期各单元对 NO_3^- -N的去除率,如图8所示。

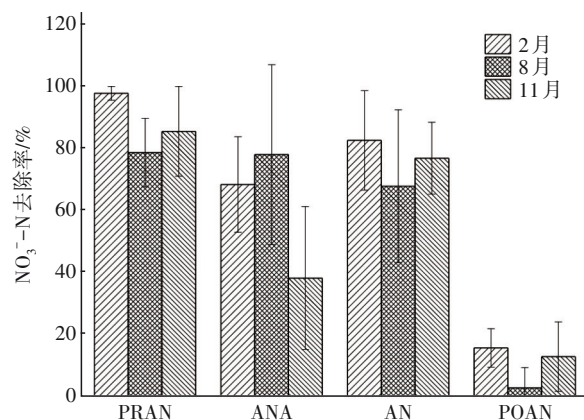


图8 不同月份各单元对 NO_3^- -N的去除率

Fig.8 NO_3^- -N removal rates in different units at different months

由图8可知,前缺氧区、缺氧区和后缺氧区对 NO_3^- -N的去除率均为:2月>11月>8月,这与3个月份的脱氮效率保持一致。前缺氧区对 NO_3^- -N的去除率在2月份高达 97% ,在8月份也达到了 78% ,说明前缺氧区的反硝化彻底,出水 NO_3^- -N平均浓度可低至 0.14 mg/L 。缺氧区2月份的 NO_3^- -N去除率高

达82%,8月份为68%,从这两个月份的缺氧区出水NO₃⁻-N平均浓度(分别为0.85、1.49 mg/L)来看,缺氧区反硝化效率有提高潜力。后缺氧区的NO₃⁻-N去除率分别仅为3%~16%,碳源不足是其限制因素,存在巨大的挖潜空间。

2.4 脱氮方程式和关键控制因子

基于传统的反硝化脱氮理论,在硝化和反硝化完全的情况下,缺氧单元出水NO₃⁻-N浓度(C_{AN})理论为0。但在实际运行中,受到上述各种因素的影响,反硝化效果无法达到理论值,缺氧单元实际出水NO₃⁻-N浓度为0~5.38 mg/L。故实际反硝化脱氮率E₁(前缺氧区、厌氧区和缺氧区的NO₃⁻-N去除率总和)低于理论脱氮率E₀。反硝化脱氮率计算公式如下:

$$E_0 = \frac{R+r}{1+R+r} \quad (9)$$

$$E_1 = \frac{(R+r)C_R - (1+R+r)C_{AN}}{(1+R+r)C_R} = E_0 - \frac{C_{AN}}{C_R} \quad (10)$$

为了探讨反硝化作用对出水NO₃⁻-N浓度的影响,识别反硝化效果的控制因子,拟建立反硝化质量平衡方程。除了传统反硝化对NO₃⁻-N的去除,污水处理厂中普遍存在微生物的同化以及同步硝化

反硝化作用。假设微生物同化和同步硝化反硝化作用对TN的去除率为E₂。尽管该污水厂的硝化较完全,平均出水NH₄⁺-N浓度(C_{NH₃})为0.3 mg/L,仍然为影响脱氮方程的因素。故根据E₁+E₂的计算公式(11),建立基于反硝化脱氮的质量平衡方程,如式(12)所示。

$$E_1 + E_2 = E_0 - \frac{C_{AN}}{C_R} + E_2 = \frac{C_0 - C_R - C_{NH_3}}{C_0} \quad (11)$$

$$C_R^2 - [(1 - E_2 - E_0)C_0 - C_{NH_3}]C_R - C_0C_{AN} = 0 \quad (12)$$

式中:C₀为进水总凯氏氮浓度,假设C₀≈C_{TN},mg/L;C_{NH₃}为出水NH₄⁺-N浓度,好氧区出水浓度等于最终出水浓度,mg/L。

根据式(12),求解可得到内回流NO₃⁻-N浓度(C_R)与相关因子的关系,见式(13)。为了进一步获得出水TN与相关因子的关系,还需统计计算后缺氧区对脱氮的贡献,这也是区别传统A²/O工艺的重要特征。在不同的碳源条件下后缺氧区对NO₃⁻-N的去除效果不同,假设其对NO₃⁻-N的去除量为Δ_{PO},且出水TN只包括NH₄⁺-N和NO₃⁻-N。则最终出水TN浓度(C_{TN2})的计算方程式见式(14)。

$$C_R = \frac{(1 - E_2 - E_0)C_0 - C_{NH_3} + \sqrt{[(1 - E_2 - E_0)C_0 - C_{NH_3}]^2 + 4C_0C_{AN}}}{2} \quad (13)$$

$$C_{TN2} = \frac{\left(1 - E_2 - \frac{R+r}{1+R+r}\right)C_0 - C_{NH_3} + \sqrt{\left[\left(1 - E_2 - \frac{R+r}{1+R+r}\right)C_0 - C_{NH_3}\right]^2 + 4C_0C_{AN}}}{2} - \Delta_{PO} + C_{NH_3} \quad (14)$$

由式(14)可知,在一定的进水TN浓度下,微生物同化作用对TN的去除率(E₂)较小且相对稳定,而系统的完全硝化导致C_{NH₃}浓度较低且基本稳定,对出水TN浓度的影响较小。而对出水TN影响较大的关键控制因子主要是:回流比(r+R)、缺氧区出水NO₃⁻-N浓度(C_{AN})、后缺氧区对NO₃⁻-N的去除量(Δ_{PO})。因此,在实际运行中可以根据脱氮目标,基于关键控制因子制定调控策略,实现对脱氮工艺的优化运行。

2.5 深度脱氮的优化运行和调控策略

以该综合污水处理厂为例,为了达到更严格的TN排放目标(<6 mg/L),通过工艺的优化运行和调控实现深度脱氮。根据式(14),深度脱氮优化调控

的核心是反硝化单元。

针对不同的进水TN浓度,回流比宜根据TN浓度动态调整,回流比(r+R)适宜的范围为230%~450%,过大的回流比不仅造成能耗上的大幅增加,还会带入大量溶解氧影响反硝化脱氮效果。在此回流比条件下,长期运行数据表明,C_{AN}<0.8 mg/L的累积频率可达到44.7%,这也为工艺优化提供了挖潜空间和实践基础。基于式(14),当进水TN<30 mg/L时,控制因子C_{AN}<0.6 mg/L,出水TN<6.3 mg/L;当TN>30 mg/L时,由于历史统计数据C_{AN}≈0很难稳定控制,故需要结合在后缺氧区投加碳源对TN的去除贡献。根据该污水厂的实际经验数据,当后缺氧区投加10~20 mg/L乙酸时,Δ_{PO}=2.4~3.6 mg/L。不同进水条件下的优化控制参数如表2所示。

表2 深度脱氮的优化控制因子
Tab.2 Control factors and range for advanced removal of nitrogen

进水 TN/(mg·L ⁻¹)	25	30	35	40	45	50
回流比(R+r)/%	300	330	350	380	410	450
C _{AN} /(mg·L ⁻¹)	0.6	0.6	0.8	0.8	0.8	0.8
碳源投加量/(mg·L ⁻¹)	0	0~10	10	10	20	20
出水 TN/(mg·L ⁻¹)	5.7	5.0~6.3	5.3	5.7	4.9	5.2
TN 去除率/%	77.2	79.0~83.3	84.9	85.8	89.1	89.6

通过工艺的优化措施实现以上控制因子目标,建立了工艺的过程调控策略,如图9所示。①硝化反应:控制好氧区末端NH₄⁺-N浓度(0.5~1.0 mg/L),通过对碱度、好氧区DO、泥龄的控制实现目标值。

②反硝化反应:包括前缺氧区、缺氧区和后缺氧区,前缺氧区和缺氧区通过NO₃⁻-N浓度来控制(C_{AN}<0.8 mg/L),C_{AN}控制目标与回流比之间有一定的关联,故需要结合好氧区出水NO₃⁻-N(C_R<9 mg/L)控制其耦合关系。

具体优化调控措施包括:①调整曝气量,控制DO;②调整兼氧区运行方式,改变不同功能单元的HRT;③控制进水量,改变HRT、回流比;④调整进水分配比例,优化碳源结构;⑤改变多点回流,改变反应区域;⑥调整回流;⑦投加碳源。除此之外,构建高效的微生物群落结构和表达活性也是影响其效果的重要因素。

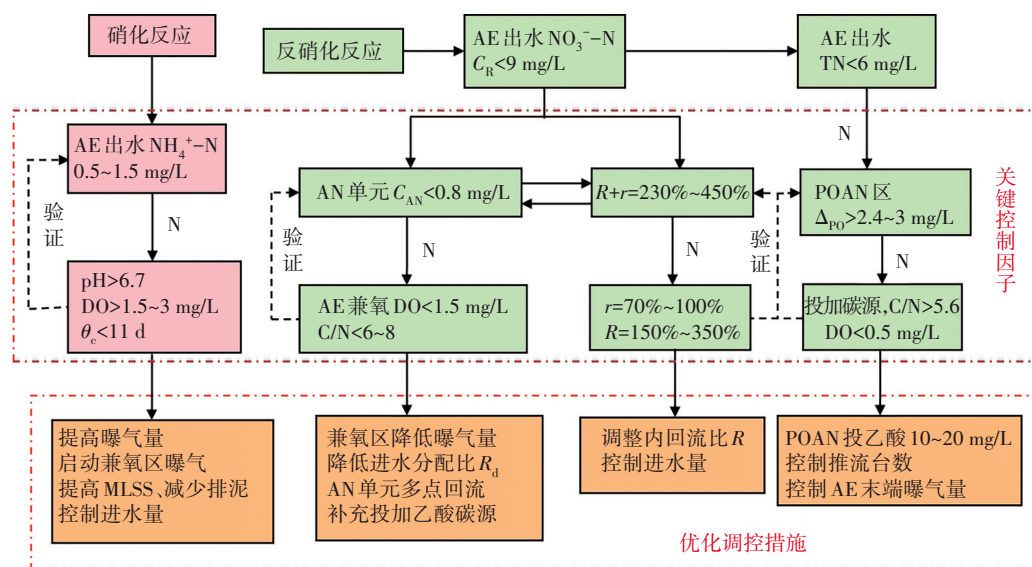


图9 深度脱氮的优化调控策略

Fig.9 Process optimization and control for advanced removal of nitrogen

3 结论

① 某综合污水处理厂采用A²/O+A/O的双缺氧强化脱氮工艺,18个月的运行数据表明,出水TN浓度整体呈现波动变化,平均浓度为7.9 mg/L,月平均去除率差异较大,在63.8%~83.9%之间,优于传统A²/O工艺的运行效果,但仍存在较大的脱氮挖潜空间。

② 脱氮诊断和分析表明,缺氧区的反硝化反应不稳定,其出水NO₃⁻-N>1.6 mg/L的比例高达35.5%,反硝化并不完全;后缺氧区对NO₃⁻-N的去除量平均在1.0 mg/L左右,平均去除率为13.9%,碳源是制约后缺氧区脱氮效率的核心因素;前缺氧区和厌氧区的反硝化反应较完全,不是脱氮的制约因素。

③ 对2月、8月和11月的脱氮贡献对比分析表明,缺氧区和前缺氧区依然是脱氮的主要区域,这两个区域在3个不同月份的脱氮贡献占比分别为55.7%~60.8%、19.4%~28.5%。其中,前缺氧区和缺氧区在2月份对NO₃⁻-N的去除率最高,分别达到了97%和82%,这也是导致其TN去除率较高(83.3%)的原因。

④ 结合污水处理厂长期运行数据,建立了出水TN的控制方程式,回流比(R+r)、缺氧区出水NO₃⁻-N浓度(C_{AN})、后缺氧区对NO₃⁻-N的去除量(Δp₀)是深度脱氮的关键控制因子。为了实现深度脱氮效果(TN<6 mg/L),建立了工艺的过程控制和调控策略,回流比(R+r)根据进水TN浓度调整控制(230%~450%),缺氧区控制C_{AN}<0.8 mg/L,Δp₀根据

削减目标确定,一般乙酸投加量为0~20 mg/L。

参考文献:

- [1] 刘金瀚,白宇,林海,等.反硝化生物滤池用于污水深度脱氮研究[J].中国给水排水,2008,24(21):26-29.
LIU Jinhan, BAI Yu, LIN Hai, *et al.* Study on denitrifying biofilter for advanced wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(21): 26-29 (in Chinese).
- [2] 沈晓铃,李大成,蒋岚岚,等.深床反硝化滤池在污水厂提标扩建工程中的应用[J].中国给水排水,2010,26(4):32-34.
SHEN Xiaoling, LI Dacheng, JIANG Lanlan, *et al.* Application of deep-bed denitrification filter in upgrading and extension project of WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(4): 32-34 (in Chinese).
- [3] 陈亚松,颜孜佳,文嘉,等.改良型A²O工艺的脱氮诊断分析[J].中国给水排水,2010,26(18):23-27.
CHEN Yasong, YAN Zijia, WEN Jia, *et al.* Diagnosis analysis on nitrogen removal by modified A²O process [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(18): 23-27 (in Chinese).
- [4] BROWN P, ONG S K, LEE Y W. Influence of anoxic and anaerobic hydraulic retention time on biological nitrogen and phosphorus removal in a membrane bioreactor [J]. Desalination, 2011, 270 (1/3): 227-232.
- [5] SAUNDERS A M, ALBERTSEN M, VOLLERTSEN J, *et al.* The activated sludge ecosystem contains a core community of abundant organisms [J]. ISME Journal, 2016, 10(1): 11-20.
- [6] 陈亚松.用于污水强化脱氮的双缺氧脱氮方法及设备:201110023588.9[P].2013-04-24.
CHEN Yasong. Double Anoxic Denitrification Method and Equipment for Enhanced Denitrification of Sewage: 201110023588.9[P]. 2013-04-24 (in Chinese).
- [7] 彭永臻,王晓莲,王淑莹.A/O脱氮工艺影响因素及其控制策略的研究[J].哈尔滨工业大学学报,2005,37(8):1053-1057.
PENG Yongzhen, WANG Xiaolian, WANG Shuying. Study on influence factors and control strategies of A/O nitrogen removal process [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(8): 1053-1057 (in Chinese).
- [8] Water Environment Federation Technical Practice Committee. Nutrient Removal [M]. New York: McGraw-Hill Education Professional Publishing, 2010.
- [9] ZHOU Y, PIJUAN M, YUAN Z. Free nitrous acid inhibition on anoxic phosphorus uptake and denitrification by poly-phosphate accumulating organisms [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2007, 98(4): 903-912.
- [10] CHEN Y S, ZHAO Z, PENG Y K, *et al.* Performance of a full-scale modified anaerobic/anoxic/oxic process: high-throughput sequence analysis of its microbial structures and their community functions [J]. Bioresource Technology, 2016, 220: 225-232.

作者简介:陈亚松(1982-),男,湖北大冶人,博士,正高级工程师,注册公用设备工程师(给水排水)、注册环保工程师、注册咨询工程师(投资),主要从事水环境治理技术研究和应用工作。

E-mail:chen_yasong@ctg.com.cn

收稿日期:2021-08-14

修回日期:2021-11-02

(编辑:刘贵春)

科学防御水旱灾害,有效促进人水和谐