

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.18.018

# 生物膜强化多级AO工程智能设计与运行

张璐晶<sup>1,2</sup>, 江乐勇<sup>1</sup>, 庞洪涛<sup>1</sup>, 孙舒祺<sup>3</sup>, 彭永臻<sup>4</sup>, 孙事昊<sup>1</sup>,  
杨慎华<sup>1,4</sup>, 刘成军<sup>1</sup>, 马 斌<sup>5</sup>

(1. 信开环境投资有限公司, 北京 101101; 2. 中国社会科学院 数量经济与技术经济研究所, 北京 100732; 3. 海口龙华信开水务有限公司, 海南 海口 570100; 4. 北京工业大学 城镇污水处理与资源化利用技术国家工程实验室, 北京 100024; 5. 海南大学 环境科学与工程学院, 海南 海口 570228)

**摘 要:** 生物膜强化多级AO是一种新型生化处理工艺,兼具分级进水和生物膜强化的优势。基于某城市污水处理厂生物膜强化多级AO工艺的工程应用,从工艺优势分析着手,发挥其多点进水特点,介绍了工艺设计思路,并实际监测了生化段的进、出水 and 工艺沿程水质。2个月的运行监测结果显示,生化段出水氨氮均值为0.3 mg/L、总氮均值为4.7 mg/L、总磷均值为0.23 mg/L,达到了极佳的氮磷协同处理效果;生化段出水达到了TN≤5 mg/L的标准。该工程的设计运行可为极限脱氮与氮磷协同处理提供良好的工程示范。

**关键词:** 生物膜强化多级AO; 工艺设计; 极限脱氮; 氮磷协同处理

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)18-0103-10

## Intelligent Design and Operation of a Biofilm Enhanced Multi-stage AO Project

ZHANG Lu-jing<sup>1,2</sup>, JIANG Le-yong<sup>1</sup>, PANG Hong-tao<sup>1</sup>, SUN Shu-qi<sup>3</sup>,  
PENG Yong-zhen<sup>4</sup>, SUN Shi-hao<sup>1</sup>, YANG Shen-hua<sup>1,4</sup>, LIU Cheng-jun<sup>1</sup>, MA Bin<sup>5</sup>

(1. Xinkai Environment Investment Co. Ltd., Beijing 101101, China; 2. Institute of Quantitative & Technological Economics, CASS, Beijing 100732, China; 3. Haikou Longhua Xinkai Water Co. Ltd., Haikou 570100, China; 4. National Engineering Laboratory for Advanced Municipal Wastewater Treatment and Reuse Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100024, China; 5. School of Environmental Science and Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China)

**Abstract:** The biofilm enhanced multi-stage AO process is a novel biochemical treatment technology, which has both advantages of step-feed and biofilm. This paper describes the process design idea starting with analyzing the advantage of the process and elaborating the characteristics of step-feed system based on a project application. The inlet, outlet and the water quality data along the biochemical section was monitored. The results of 2-month operation showed that the mean value of ammonia nitrogen, total nitrogen and total phosphorus was 0.3 mg/L, 4.7 mg/L and 0.23 mg/L, respectively, which achieved excellent nitrogen and phosphorus co-treatment performance. At the end of biochemical system, the

基金项目: 北京市通州区科技创新人才资助项目(JCQN2023003)

通信作者: 孙事昊 E-mail: ssh\_fire@163.com

effluent from the biochemical section reached the standard  $TN \leq 5 \text{ mg/L}$ . The design and operation of this project provide an engineering demonstration for the ultimate nitrogen removal and nitrogen and phosphorus co-treatment.

**Key words:** biofilm enhanced multi-stage AO; process design; ultimate nitrogen removal; nitrogen and phosphorus co-treatment

生物膜强化多级AO是一种将多级AO与泥膜混合工艺相结合的新型工艺,从前向后分为第一级缺氧池、第一级好氧池、第二级缺氧池、第二级好氧池……其中缺氧池、好氧池均可投加填料,原水分级进入各缺氧池,回流污泥回流到系统的首端。该工艺不仅具备了多级AO分级进水带来的优势,例如活性污泥量大、容积负荷高、无需设置内回流即能实现较高的TN去除率<sup>[1-3]</sup>等;同时兼具泥膜混合工艺耦合新型脱氮路径的优势,例如同步硝化反硝化、短程硝化、短程反硝化、厌氧氨氧化等,可以实现高效节能的深度脱氮除磷。

多级AO工艺已在多个工程中得到了应用和验证<sup>[4-5]</sup>,体现出更好的脱氮效果、更短的停留时间、更低的运行电耗等优势。关于用生物膜提高多级AO工艺性能的思路在小试研究中也有报道,例如赵宪章等<sup>[6]</sup>针对低温下处理效果差的难题,通过在好氧池投加生物填料实现了一个小试规模(240 L/d)两级AO的脱氮性能提升,并且实现了悬浮污泥和附着污泥低温下硝化性能的同步提高,验证了填料对多级AO工艺具有显著的优化效果。但是,生物膜对于多级AO强化不仅体现在保证低温下的硝化性能,生物膜可以附着更长污泥龄的菌种,这为系统的功能菌群提供了更多维的可能<sup>[7]</sup>;生物膜投加到好氧池可以实现同步硝化反硝化<sup>[8]</sup>、短程硝化耦合厌氧氨氧化<sup>[9-10]</sup>;生物膜投加到缺氧池,短程反硝化耦合厌氧氨氧化的脱氮路径已在万吨级的污水处理工程实现<sup>[11]</sup>。也就是说,理想的生物膜强化多级AO工艺,在缺氧池可以实现全程反硝化与短程反硝化耦合厌氧氨氧化两种脱氮路径,在好氧池实现全程硝化、同步硝化反硝化、短程硝化耦合厌氧氨氧化三种脱氮路径。综合来看,多种脱氮路径将在无需投加外碳源的条件下促进总氮去除,并且为生物除磷提供更有利的条件。同时,由于工艺具备了多个进水点位和多个回流点位,因此工艺调整的丰富性极高,在不同进水条件和外部环境可以智能

切换,是一种节能降耗的新型工艺。

然而,生物膜强化多级AO工艺目前还没有典型工程案例报道,其设计、运行、优化也缺少相关研究。以海南某下沉式再生水厂生化单元为研究对象,从生物膜强化多级AO工艺设计、运行两方面入手,分析工艺优势和实际运行数据,以期分为级进水和生物膜强化的耦合工艺提供参考。

## 1 工程概况

该再生水厂总处理规模 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,设计进、出水水质见表1。其中,生化单元分为3个系列,每个系列设计规模 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,近期按照2个系列运行。该厂服务范围内有多个海鲜市场,水质波动较大,因此需要选择一种耐冲击、效率高的处理工艺。经过综合方案比选,最终决定选用生物膜强化三级AO工艺,促进总氮、总磷的同步高效去除,并实现节能降耗。

表1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	COD	BOD <sub>5</sub>	SS	NH <sub>3</sub> -N	TN	TP
设计进水水质	370	140	240	30	40	5
设计出水水质	40	10	10	2	15	0.4

在设计时,为了实现更高效的总氮去除和更加灵活的调整优化,并适度超前考虑AOA工艺的转换,总体设计思路考虑智能可切换模式。生物膜强化多级AO工艺在选择级数时需要综合考虑进水水质和现场条件<sup>[1]</sup>,以生物膜强化三级AO工艺为例进行介绍,其他级数的设计可以参考。

## 2 工艺设计计算和优化

### 2.1 工艺优势

#### 2.1.1 三级AO硝化优势

三级AO每一级的活性污泥浓度为:

$$X_i = \frac{R \times X_R}{R + \sum_{i=1}^i \alpha_i} \quad (1)$$

式中:  $X_i$  为第  $i$  级的污泥浓度,  $i=1, 2, 3$ , g/L;  $X_R$  为二沉池回流污泥的污泥浓度, g/L;  $\alpha_i$  为第  $i$  级进水比例,  $0 < \alpha_i \leq 1$  且  $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$ ;  $R$  为污泥回流比。

因此, 反应器平均污泥浓度为:

$$X_v = (X_1 \times V_1 + X_2 \times V_2 + X_3 \times V_3) / (V_1 + V_2 + V_3) = \left( \frac{R \times X_R}{R + \alpha_1} \times V_1 + \frac{R \times X_R}{R + \alpha_1 + \alpha_2} \times V_2 + \frac{R \times X_R}{R + 1} \times V_3 \right) / (V_1 + V_2 + V_3) \quad (2)$$

式中:  $X_v$  为平均污泥浓度, g/L;  $V_i$  为第  $i$  级池容,  $i=1, 2, 3$ , 每一级池容是该级缺氧和好氧池容之和, L。

当控制进入二沉池的污泥浓度相同时, 三级AO工艺平均污泥浓度永远大于AAO工艺, 同样的池容可以提供更多的活性污泥, 从而提高整体容积负荷<sup>[3]</sup>。提高的倍数与进水分配比和池容比有关, 以我国北部某下沉厂三级AO的设计<sup>[12-13]</sup>为例, 其在池容比为1:1.3:1.6、进水分配比为1:1:1的情况下, 相较于AAO, 总污泥量可提升1.3倍。

### 2.1.2 三级AO的反硝化优势

三级AO无需内回流也可以达到较好的总氮去除效果, 其理论最大脱氮率<sup>[14]</sup>为:

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{\alpha_3}{1 + R + r_3} \quad (3)$$

式中:  $\eta_{\max}$  为理论最大脱氮率;  $r_3$  为第3级内回流比,  $r_3 \geq 0$ 。

式(3)是理论最大值, 需要满足相应条件, 例如每一级硝化完全、原水碳源满足反硝化完全的需求等。三级AO并不设置从  $O_3$  向  $A_1$  的内回流, 原因在于会破坏三级之间的污泥梯度, 导致每一级污泥负荷失衡。第一级内回流( $O_1 \rightarrow A_1$ )、第二级内回流( $O_2 \rightarrow A_2$ )并不会提高理论最大脱氮率, 理论最大脱氮率与污泥回流、第三级内回流、流量分配比相关。AAO工艺的理论最大脱氮率  $= 1 - 1/(1 + R' + r')$ , 式中  $R'$ 、 $r'$  分别为AAO工艺的外回流比、内回流比, 与式(3)相比可以得到: 三级AO的理论最大脱氮率大于AAO, 但需满足一个条件:  $\alpha_3 < (1 + R + r_3)/(1 + R' + r')$ 。这个条件实际上是容易达到的, 例如常规的AAO污泥回流比  $\geq 1$ 、内回流比  $\geq 1.5$ , 三级AO外回流选值0.75、不设置内回流,  $\alpha_3$  只需要小于0.5即可。这说明, 当需要同样的最大理论脱氮率时, 三级AO工艺的回

流比小于AAO工艺, 节省能耗。

王舜和等<sup>[2]</sup>的研究显示, 同一座污水处理厂内多级AO与多模式AAO工艺相比, 内回流泵功率可节省30 kW, 单位规模节省的功率为  $1 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$ 。

### 2.1.3 生物除磷与脱氮的协同优势

按照传统的生物除磷理论, 聚磷菌(PAOs)在厌氧和好氧的条件下分别进行释磷和过量吸磷, 最后通过排泥完成磷的去除。在这个过程中, 厌氧池(或缺氧池)硝酸盐的浓度是重要影响因素, 过高的硝酸盐浓度会造成反硝化与释磷的碳源竞争<sup>[15]</sup>, 导致释磷作用不充分, 从而削弱除磷效果。

实际上, 关于优化多级AO工艺的生物除磷性能已有较多研究<sup>[15-17]</sup>, 通过多级AO与UCT、改良AAO等的结合, 在工艺最前端设置厌氧池、预缺氧池等实现脱氮-除磷的协同, 从而提高系统除磷性能。

多级AO工艺体现出较好的氨氮、硝氮处理能力, 而生物膜强化后耦合的新型脱氮路径, 也更有利于多级AO工艺脱氮-除磷的协同, 这对于第一级缺氧池非常有利: ①出水总氮低, 通过污泥回流到第一级缺氧池的硝态氮浓度就低, 反硝化对碳源的消耗变少, 进水中的碳源可以更多地用于聚磷菌的释磷过程; ②第一级污泥浓度高, 已有的工程已验证较高的污泥浓度可以促进内碳源的利用<sup>[16]</sup>, 为第一级的反硝化、释磷提供额外的电子供体。

## 2.2 设计级数确定

由式(3)可知, 级数并不影响理论最大脱氮率。但是由式(1)、(2)可知, 反应器的级数会影响总污泥浓度, 进而影响容积负荷。祝贵兵<sup>[1]</sup>论述了增加级数以获得最高处理速率的推导过程, 认为在相同处理效率的前提下, 随着级数的增加, 所需的总容积随之减少; 但是当  $n > 4$  时, 总容积的减少已不明显。根据这一分析, 3级或4级是多级AO最佳选择。考虑到系统的简洁性和便于维护性, 多会选择三级AO。经综合考虑, 该工程选择级数  $n=3$ 。

### 2.3 设计污泥回流比的确定

该工程设计进、出水总氮分别为40、15 mg/L, TN去除率为62.5%。进水C/N比值取值为BCOD/TKN, 该工程按照进水  $\text{BOD}_5$  和进水TN取值, 即  $\text{BOD}_5/\text{TN} = 140/40 = 3.5$ 。

污泥回流比、总氮去除率的计算见下式:

$$\delta = \frac{\sigma}{\tau} = \frac{C_{\text{in,BCOD}}/C_{\text{in,TKN}}}{C_{\text{理论,BCOD}}/C_{\text{in,NO}_3-\text{N}}} = \frac{C_{\text{in,BCOD}}/C_{\text{in,TKN}}}{C_{\text{理论,BCOD}}/C_{\text{in,TKN}}} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \eta = 1 - \frac{1}{1+R} \times \frac{1}{1+\delta^1+\delta^2}, & R \leq R_t \\ \eta = \delta, & R > R_t \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\delta$ 为多级AO分配系数; $\sigma$ 为实际进水C/N比值,取3.5; $\tau$ 为对于某特定的污水,单位 $\text{NO}_3^-$ -N全部转化为氮气所需的BCOD,取4.5; $R_t$ 为此种进水条件下最大脱氮效率时的污泥回流值<sup>[3]</sup>, $R_t=(\sigma/\tau)^3/[1-(\sigma/\tau)^3]$ 。

依据式(5)可绘出不同取值时的 $\eta$ - $R$ 关系,如图1所示。

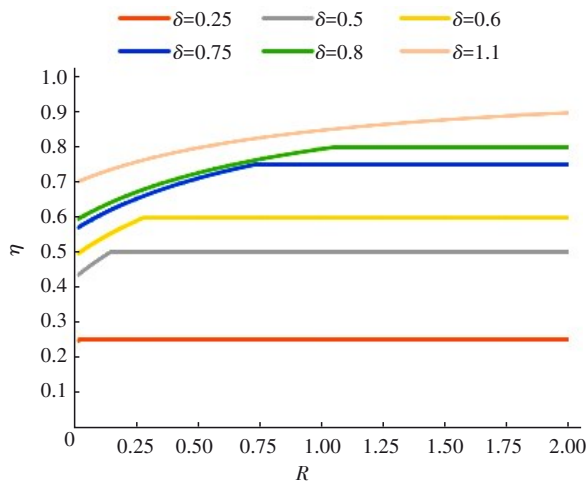


图1 三级AO的 $\eta$ - $R$ 关系

Fig.1  $\eta$ - $R$  relationship of three-stage AO process

对照该项目, $\delta=3.5 \div 4.5=0.78$ ,可知该条曲线在 $\delta=0.75$ 和 $\delta=0.8$ 之间, $R$ 值大约在 $R=1$ 时再提高也对总氮去除率提升没有作用。

因此,该项目选择 $R=1$ ,设备选型时选择流量可达到 $R=2.0$ 的泵型,确保工艺的可调性。

#### 2.4 设计池体比例及进水分配比确定

按照等污泥负荷原则设计<sup>[1,17]</sup>,可以有如下方程组:

$$\begin{cases} \frac{\alpha_1(R+\alpha_1)}{V_1} = \frac{\alpha_2(R+\alpha_1+\alpha_2)}{V_2} = \\ \frac{\alpha_3(R+\alpha_1+\alpha_2+\alpha_3)}{V_3} \\ \alpha_1+\alpha_2+\alpha_3=1 \end{cases} \quad (6)$$

其中式(6)由以下3个方程联立后推导。假设每一级的硝化均完全,即式(8)中二沉池出水氨氮

的浓度 $C_{\text{ef,NH}_3-\text{N}}$ 、式(9)中每一级出水氨氮浓度均可忽略:

$$\begin{aligned} F_{1,\text{NH}_3-\text{N}} &= [Q(\alpha_1+R)] \times \\ &[(C_{\text{in,NH}_3-\text{N}} \times \alpha_1 + C_{\text{ef,NH}_3-\text{N}} \times R)/(\alpha_1+R)] \times \\ V_1^{-1} &= \frac{\alpha_1}{V_1} \times C_{\text{in,NH}_3-\text{N}} \times Q \end{aligned} \quad (8)$$

$$\frac{F_{i,\text{NH}_3-\text{N}}}{M_{\text{Ni}}} = \frac{\alpha_i}{V_i} \times \frac{R + \sum_{t=1}^i \alpha_t}{R \times X_R} \times C_{\text{in,NH}_3-\text{N}} \times Q \quad (9)$$

$$\frac{F_{1,\text{NH}_3-\text{N}}}{M_{\text{N1}}} = \frac{F_{2,\text{NH}_3-\text{N}}}{M_{\text{N2}}} = \frac{F_{3,\text{NH}_3-\text{N}}}{M_{\text{N3}}} \quad (10)$$

式中: $F_{i,\text{NH}_3-\text{N}}$ 为第 $i$ 级的氨氮容积负荷, $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{h})$ ;  $M_{\text{Ni}}$ 为好氧段硝化菌浓度,对同一个反应器内的污泥絮体来说,硝化菌占总生物量的比例是确定的(定义为 $f_N$ ),则 $M_{\text{Ni}}=X_i \times f_N$ 。

根据式(6)、(7)联立方程组,并代入 $R=1$ 的条件,计算可得:

$$\frac{\alpha_1(1+\alpha_1)}{V_1} = \frac{\alpha_2(1+\alpha_1+\alpha_2)}{V_2} = \frac{\alpha_3 \times 2}{V_3} \quad (11)$$

式(11)反映了 $R=1$ 时三级进水与三级好氧池容积之间的关系,可再依据工程特点选择相等进水比例( $\alpha_1:\alpha_2:\alpha_3=1:1:1$ )、相等池容比例( $V_1:V_2:V_3=1:1:1$ )或者都不相等来进行设计和运行。

依据该下沉厂的平面布局,三级之间池容比例设定为 $V_1:V_2:V_3=1:1.15:1.35$ ,根据式(11),方程没有解析解,规划求解可得特殊解:设计进水分配比为 $\alpha_1:\alpha_2:\alpha_3=0.36:0.33:0.31$ 。

#### 2.5 设计缺氧池比例

按照每一级缺/好氧池比例为0.34进行设计,则可知第一级缺氧池、第一级好氧池、第二级缺氧池、第二级好氧池、第三级缺氧池、第三级好氧池的容积比例: $V_{A1}:V_{O1}:V_{A2}:V_{O2}:V_{A3}:V_{O3}=0.34:0.66:0.39:0.76:0.46:0.89$ 。

#### 2.6 兼性池及最后一级内回流设计

考虑到生化系统的平衡性和多样性,将好氧池设计为可切换缺/好氧状态的池体,装载搅拌及曝气盘。

一般而言,为使三级AO具备更高总氮去除率的可能性,可以设计最后一级内回流系统,即从第三级好氧池向第三级缺氧池的回流,必要时开启,可通过向第三级缺氧池投加外碳源来提供额外的



反硝化能力。综合考虑工艺的多样性,即工艺可以切换为AAO、AOA运行,设计一条内回流廊道可由第三级好氧池回流,并在第一级缺氧池、第二级缺氧池、第三级缺氧池开设闸门控制回流点位,最大回流比设计为1.5,常规时间无需开启,设备选型时选择可调流量型泵。

## 2.7 设计污泥浓度

三级AO的三级之间污泥浓度存在梯度,设计优化时计算池体内所有生物量要考虑2个方面:①控制 $O_3$ 池的污泥浓度,并以此反算所有池体的污泥浓度;②二沉池的固体负荷。这两个方面存在一定的矛盾,当控制生化池末端的污泥浓度相同时,多级AO工艺需要二沉池污泥的浓缩性能比常规AAO高,以提高回流污泥浓度。一般工艺设计的二沉池固体负荷,参考第三版给水排水设计手册中给出的值 $\leq 150 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,但对于多级AO应取更小的二沉池固体负荷值,否则无法提供足够的回流污泥或造成二沉池泥位过高。

该工程设计控制 $O_3$ 池污泥浓度为 $3\,000 \text{ mg/L}$ ,忽略污泥在生化系统的生长和衰减作用,计算得各级池体的污泥浓度如表2所示。

表2 各级池体污泥浓度

Tab.2 MLSS of different biological tanks

项目	第一级池体	第二级池体	第三级池体	回流污泥
污泥浓度	5 349	3 945	3 000	7 478

由表2可知,回流污泥浓度为 $7\,478 \text{ mg/L}$ ,意味着如果二沉池回流污泥浓度无法达到此值,那么 $O_3$ 池污泥浓度将无法达到 $3\,000 \text{ mg/L}$ ,可能会影响生化系统性能。因此二沉池的设计尤为重要,污泥浓缩的性能将直接影响多级AO的运行效率,需特别注意固体负荷和泥区的停留时间设计。实际运行时,如果选择“不排泥”来提高回流污泥浓度,必然导致二沉池泥位较高,并不利于系统的稳定。

## 2.8 池体容积

按照下式计算好氧池容积:

$$\mu_N = 0.47 \times e^{0.098 \times (T_c - 15)} \times \frac{C_{\text{内控}, \text{NH}_3 - \text{N}}}{C_{\text{内控}, \text{NH}_3 - \text{N}} + 1} \quad (12)$$

$$\theta_{C, \min} = 1/\mu_N \quad (13)$$

$$\theta_C = K \times \theta_{C, \min} \quad (14)$$

$$V_O = \frac{Y \times Q \times (C_{\text{in}, \text{BOD}_5} - C_{\text{ef}, \text{BOD}_5}) \times \theta_C}{X_{\text{MLVSS}}} \quad (15)$$

式中: $\mu_N$ 为最不利硝化菌比生长速率, $\text{d}^{-1}$ ;  $T_c$ 为设计水温, $^{\circ}\text{C}$ ;  $C_{\text{内控}, \text{NH}_3 - \text{N}}$ 为内控的出水氨氮浓度, $\text{mg/L}$ ;  $\theta_{C, \min}$ 为最不利污泥龄, $\text{d}$ ;  $\theta_C$ 为设计污泥龄, $\text{d}$ ;  $K$ 为污泥龄安全系数,一般选择3;  $V_O$ 为好氧池总容积, $\text{L}$ ;  $Y$ 为污泥产率系数,一般取 $0.3 \sim 0.6 \text{ kgVSS/kgBOD}_5$ ;  $C_{\text{in}, \text{BOD}_5}$ 、 $C_{\text{ef}, \text{BOD}_5}$ 分别为设计进水、设计出水 $\text{BOD}_5$ 浓度, $\text{mg/L}$ ;  $X_{\text{MLVSS}}$ 为反应器内平均VSS浓度, $\text{mg/L}$ ,该工程以 $X_{\text{MLVSS}}:X_{\text{MLSS}}=0.6$ 计算。

计算可得 $V_O=3\,873 \text{ m}^3$ ,根据2.4节各级比例可求出每一级好氧池容积,再根据2.5节的方法,可设计出各级缺氧池的池容。计算完成后可知第一级缺氧池、第一级好氧池、第二级缺氧池、第二级好氧池、第三级缺氧池、第三级好氧池的水力停留时间(HRT)分别为1.3、2.5、1.6、3.2、1.8、3.6 h。

依据HRT取值,再根据该再生水厂整体的平面布局、结构专业要求,按照最优原则再进行适当的微调,完成最终的池体池容设计。

## 2.9 填料投加比例

综合考虑现场条件和进水条件,第一批按照5%投加生物膜填料,投加进入第一级好氧池、第二级好氧池,并设计筛网对填料进行拦截。

## 2.10 池型选择

缺氧池和好氧池的池型选择与设计见图2。

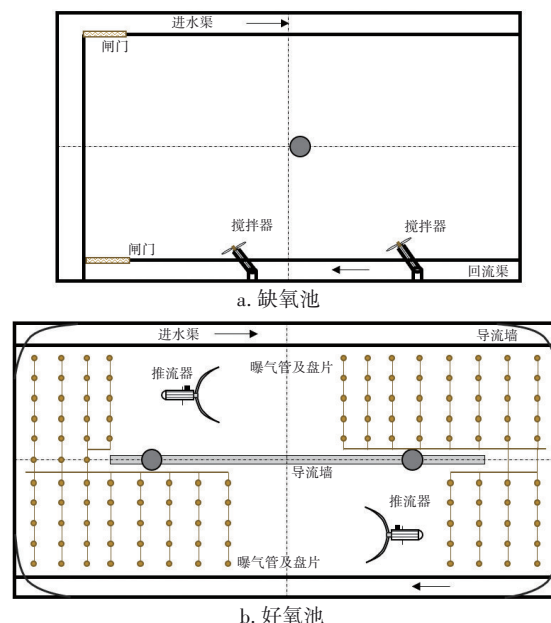


图2 缺氧池和好氧池的池型选择与设计

Fig.2 Selection and design of tank types for anoxic and aerobic tank

为了实现填料流态的优化,特别是考虑后期

AOA工艺的转换,缺氧池设计为完全混合式,第一级好氧池、第二级好氧池、第三级好氧池均设计为环沟型。每一级好氧池均加装推流器,不仅可以保证切换为缺氧池后的搅拌效果,同时推动第一级好氧池、第二级好氧池内填料的流化状态。

### 2.11 各项设计参数的复核

在完成以上设计步骤后,对好氧池硝化负荷、总池容的TN去除负荷进行复核,与已有的工程数据进行比对,确认可行性。

#### ① 硝化负荷

设计硝化负荷计算见下式:

$$L_{\text{NH}_3-\text{N}} = \frac{Q \times (C_{\text{in},\text{NH}_3-\text{N}} - C_{\text{ef},\text{NH}_3-\text{N}})}{V_0 \times X_{\text{MLVSS}}} \quad (16)$$

式中: $L_{\text{NH}_3-\text{N}}$ 为设计硝化负荷,mg/(L·h)。

经计算, $L_{\text{NH}_3-\text{N}}=0.014 \text{ kgNH}_3\text{-N}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 。

#### ② 总氮去除负荷

设计总氮去除负荷计算见下式:

$$L_{\text{TN}} = \frac{Q \times (C_{\text{in},\text{TN}} - C_{\text{ef},\text{TN}})}{V_{\text{总}} \times X_{\text{MLVSS}}} \quad (17)$$

式中: $L_{\text{TN}}$ 为设计总氮负荷,mg/(L·h); $V_{\text{总}}$ 为总体积,L。

经计算, $L_{\text{TN}}=0.008 \text{ kgTN}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 。

通过与已有工程参数的对比可知,硝化负荷和总氮去除负荷校核满足要求。

### 2.12 总体工艺图

生化段关键参数设计完成后,总体工艺如图3

所示。

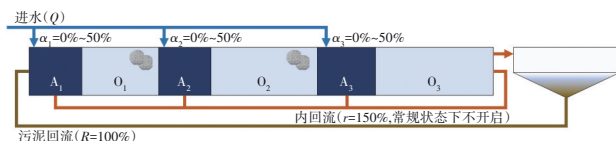


图3 生物膜强化多级AO工艺

Fig.3 Diagram of biofilm enhanced multi-stage AO process after key design

### 3 智能设计

该下沉式再生水厂在总体设计和生化设计的参数选型等确定后,需进行空间和平面的优化布置,利用自主开发的智能设计系统,搭建模块化的曝气池、搅拌池、曝气与搅拌切换池等模型,在取得工艺的计算结果后拼装完成生物膜强化多级AO工艺的单体模型。当进行再生水厂的平面布局 and 空间布局时,将该部分模型与前处理、二沉池、深度处理等其他环节单元快速组合,不断优化,形成最终方案。

智能设计系统能够快速出图,并且对于下沉式再生厂而言可将不同单元共壁布置,直观展示地下构筑物的空间关系,规避传统设计中管线交叉、空间利用率较低等问题,利用管线碰撞检查,在矩形构筑物间隙设置管线、电缆等管廊,实现精细化设计,提高节地效果。

模块化池体拼装生物膜强化多级AO工艺及其平面布置见图4。

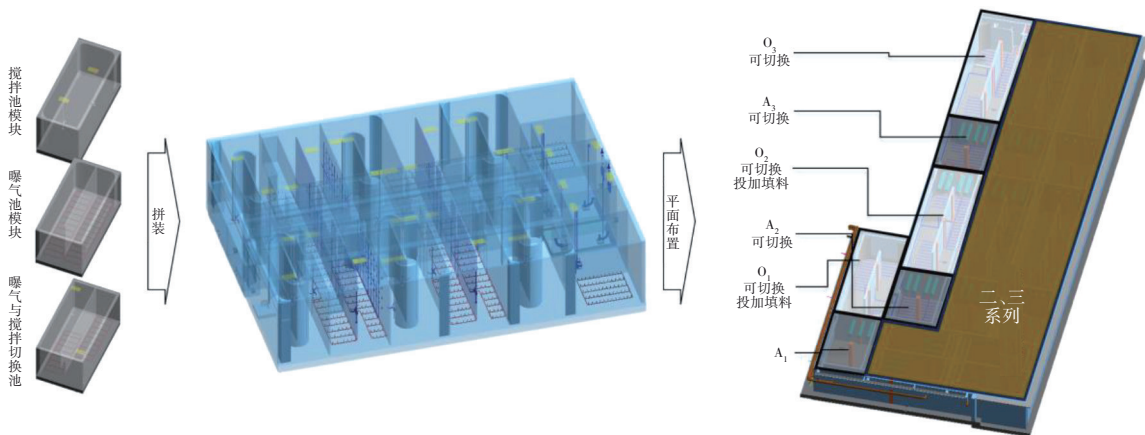


图4 模块化池体拼装生物膜强化多级AO工艺及其平面布置

Fig.4 Assembled module for biofilm enhanced multi-stage AO process and its layout

### 4 技术经济性分析

采用下沉厂形式,依照当地地势而建,高效利用了土地资源,吨水占地仅 $0.38 \text{ m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$ ,总投

资3.5亿元。其中,采用生物膜强化多级AO工艺的生化池吨水占地仅为 $0.12 \text{ m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$ ,体现了工艺的优势。

## 5 运行优化及效果

由于 $O_1$ 和 $O_2$ 池投加填料可稳定提高系统的处理负荷,在项目启动、调试阶段进行工艺优化,运行参数调整如下:

- ① 进水分配比调整为 $\alpha_1:\alpha_2:\alpha_3=0.7:0.2:0.1$ ;
- ② 污泥回流比调整为1.3;
- ③ 曝气策略调整为 $O_1$ 、 $O_2$ 较大曝气量, $O_3$ 较小曝气量。

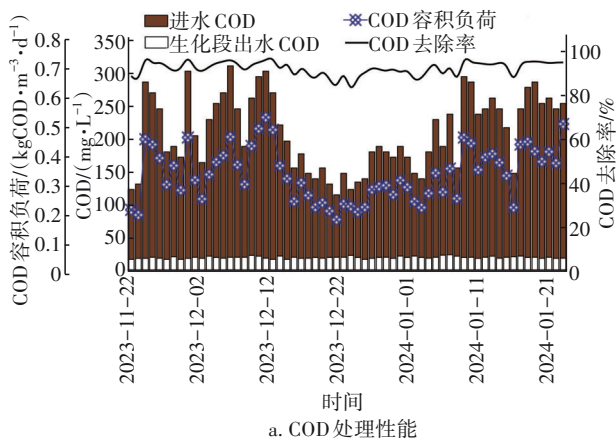
### 5.1 长期运行数据

2023年11月22日—2024年1月23日,连续监测生化池的进出水COD、氨氮、总氮、总磷,进水水质如表3所示,处理效果如图5所示。

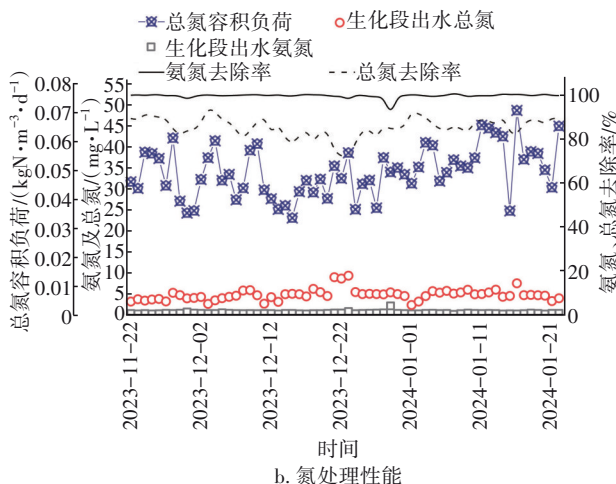
表3 实际进水水质波动范围

Tab.3 Fluctuation range of actual influent quality

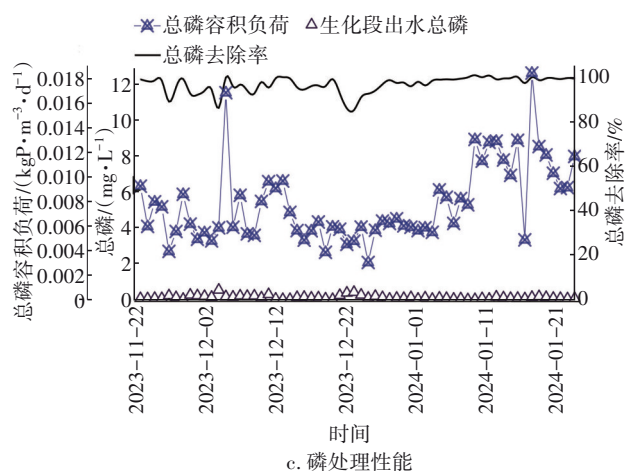
项目	COD	$NH_3-N$	TN	TP
进水水质范围	112~304	17.4~30.4	21.6~41.4	2.04~11.1
进水水质均值	204.8	23.1	31.0	4.8



a. COD处理性能



b. 氮处理性能



c. 磷处理性能

图5 2023年11月22日—2024年1月23日对COD、氮和总磷的处理效果

Fig.5 Treatment effect of COD, nitrogen and TP from Nov. 22, 2023 to Jan. 23, 2024

进水COD负荷均值为 $0.325 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,进水氮负荷均值为 $0.049 \text{ kgN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,进水磷负荷均值为 $0.0077 \text{ kgP}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。在这种进水条件下,生化系统体现出良好的处理性能:出水氨氮均值为 $0.3 \text{ mg/L}$ ,去除率均值为 $98.7\%$ ;出水总氮均值为 $4.7 \text{ mg/L}$ ,去除率均值为 $84.5\%$ ;出水总磷均值为 $0.23 \text{ mg/L}$ ,去除率为 $94.4\%$ 。

该工艺对COD、氨氮、总氮均体现出良好的处理性能,在不投加外碳源的情况下,出水总氮可以达到 $5 \text{ mg/L}$ 以下。这不仅满足了水质排放标准,为后续深度处理单元减负,也有利于最终受纳水体的水质和水生态恢复。更重要的是,我国部分地区因环境容量小而提高了污水处理厂排放标准,例如昆明地标A级为出水总氮 $5.0 \text{ mg/L}$ ,该工艺为这些需要极限脱氮的区域提供了可行的示范样板。

另外,该工艺的总磷去除性能也很好。目前很多研究聚焦于在生化池末端投加化学药剂强化除磷,该工艺具有较好的生物除磷性能,是一种更加低碳的处理方式。

### 5.2 脱氮除磷沿程数据分析

分别在生化池进水、 $A_1$ (过滤后)、 $O_1$ (过滤后)、 $A_2$ (过滤后)、 $O_2$ (过滤后)、 $A_3$ (过滤后)、 $O_3$ (过滤后)、二沉池外回流(过滤后)取样,检测COD、氨氮、总氮、总磷浓度,硝态氮浓度以总氮和氨氮差值计。生物膜强化多级AO的沿程数据如图6所示。

假定以 $A_1$ 池进水COD与 $O_1$ 池出水COD的浓度之差作为 $A_1$ 和 $O_1$ 去除的BCOD值,则计算可知去除



的BCOD为76.4-37.6=38.8 mg/L。由图6(a)可知,  $A_1$ 池末COD为38.9 mg/L, 而 $O_1$ 池末为37.6 mg/L, 二沉池污泥回流的COD为16.7 mg/L, 通过物料守恒可以计算 $A_1$ 池的进水COD为76.4 mg/L。那么依据此数据, $O_1$ 池曝气去除的COD仅有1.3 mg/L, 占3.3%,  $A_1$ 和 $O_1$ 池体中COD用于反硝化和除磷的比例为96.7%。对于第二级、第三级, 同样如此。

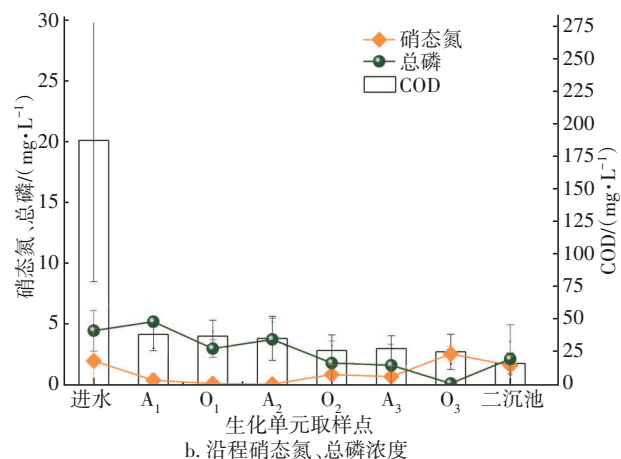
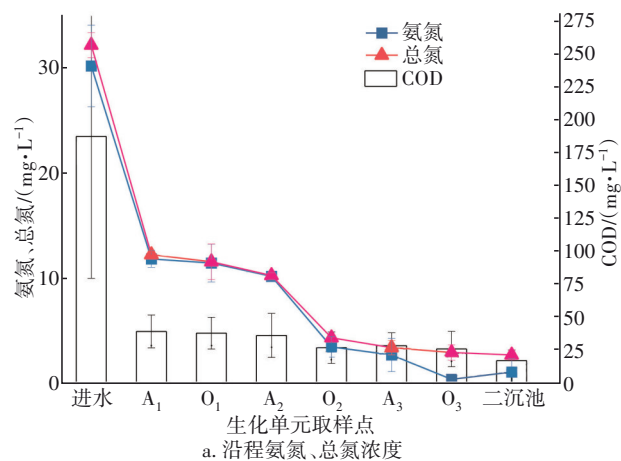


图6 生物膜强化多级AO沿程数据

Fig.6 Data along each stage of biofilm enhanced multi-stage AO process

系统的脱氮功能在好氧池也有体现,  $A_2$ 和 $O_2$ 池之间总氮下降了10.2-4.2=6.0 mg/L, 即在 $O_2$ 池发生了显著的总氮去除。

图6(b)展示了每一级COD、硝态氮、总磷的变化情况。可以看出,  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 池较好的反硝化效果导致硝态氮浓度较低, 这也为厌氧释磷提供了较好的条件, 在 $O_1$ 、 $O_2$ 、 $O_3$ 池也均可实现过量吸磷作用,  $O_3$ 池总磷仅0.14 mg/L。

需要关注的是, 二沉池总磷相对于 $O_3$ 池明显提高, 推测在二沉池内发生了一定的释磷作用。在实

际运行时, 二沉池的运行需要特别注意泥位和翻泥现象, 并实时调整。

## 6 结论

① 生物膜强化多级AO工艺的硝化、反硝化、生物除磷协同优势明显, 在 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 规模的实际工程应用效果显示, 生化段的出水总氮均值<5.0 mg/L、总磷均值<0.30 mg/L。

② 智能可切换生物膜强化多级AO的设计步骤: 先按照多级AO设计, 主要包括级数、污泥回流比、好氧池池容比例、缺氧池池容比例、污泥浓度、池容等; 然后按照填料强化计算投加比例; 完成后需校核工艺的各类负荷; 计算切换为AOA工艺的调整方式, 在池体内设计曝气和搅拌2套设备, 并依据每个池体是否投加填料、是否具备切换条件等选择合适的池型。

③ 沿程数据显示, 该工艺在缺氧池COD利用率高, 硝态氮浓度低; 同时投加生物膜填料的 $O_2$ 池表现出显著的总氮去除能力; 良好的总氮处理效果, 尤其是良好的反硝化性能, 为系统提高生物除磷性能提供了条件。

④ 不足与建议: 该设计负荷选择较为保守, 实际上生物膜的强化可以极大提高工艺的整体负荷, 具体到设计环节, 在取得生物膜强化的相关工程经验和数据后, 应提前考虑到设计计算中。另外, 对生物膜强化多级AO工艺的优势分析和数据分析深度仍有不足, 目前该工程体现出良好的脱氮除磷性能, 亟待进行深入的脱氮机理、微生物菌群结构等研究。

## 参考文献:

- [1] 祝贵兵. 缺氧好氧分段进水工艺深度脱氮性能及优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.  
ZHU Guibing. Performance and Optimization of Anoxic/Oxic Step Feeding Enhanced Biological Nitrogen Removal Process [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006 (in Chinese).
- [2] 王舜和, 李朦, 郭淑琴. 多级AO与多模式AAO工艺在污水厂的应用对比[J]. 中国给水排水, 2018, 34(10): 48-51, 57.  
WANG Shunhe, LI Meng, GUO Shuqin. Application and comparison between multistage AO and multi-mode AAO in wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(10): 48-51, 57 (in Chinese).



- [3] 孙事昊,庞洪涛,张璐晶,等. 等污泥负荷下不等池容多级AO的设计计算及优势分析[J]. 中国给水排水, 2024, 40(14): 85-94.  
SUN Shihao, PANG Hongtao, ZHANG Lujing, *et al.* Design calculation and advantage analysis of multi-stage A/O process with equal sludge load and unequal volume [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(14): 85-94 (in Chinese).
- [4] 王舜和,李朦,郭淑琴. 张贵庄污水处理厂分段进水多级AO工艺的设计与运行[J]. 中国给水排水, 2018, 34(12): 53-56.  
WANG Shunhe, LI Meng, GUO Shuqin. Design and operation for the step-feed multi-stage AO process in Tianjin Zhangguizhuang wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(12): 53-56 (in Chinese).
- [5] 李国金,李霞,王继苗,等. 青岛城阳某污水处理厂多级AO工艺的工程应用[J]. 中国给水排水, 2018, 34(8): 40-44.  
LI Guojin, LI Xia, WANG Jimiao, *et al.* Project application of multi-stage A/O process in a wastewater treatment plant in Chengyang, Qingdao [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(8): 40-44 (in Chinese).
- [6] 赵宪章,董文艺,王宏杰,等. 组合填料强化多级AO工艺处理低温污水脱氮效果[J]. 环境工程, 2018, 36(3): 49-53.  
ZHAO Xianzhang, DONG Wenyi, WANG Hongjie, *et al.* Enhancing nitrogen removal efficiency of multistage AO process with combined carrier for low temperature wastewater treatment [J]. Environmental Engineering, 2018, 36(3): 49-53 (in Chinese).
- [7] 杨慎华,张璐晶,彭永臻,等. 强化厌氧氨氧化生物膜形成的研究进展[J]. 环境工程, 2024, 42(1): 1-8.  
YANG Shenhua, ZHANG Lujing, PENG Yongzhen, *et al.* Research advances of enhancing biofilm formation of ANAMMOX [J]. Environmental Engineering, 2024, 42(1): 1-8 (in Chinese).
- [8] 张建华,彭永臻,张森,等. 同步硝化反硝化SBBR处理低C/N比生活污水的启动与稳定运行[J]. 化工学报, 2016, 67(11): 4817-4824.  
ZHANG Jianhua, PENG Yongzhen, ZHANG Miao, *et al.* Start-up and steady operation of simultaneous nitrification and denitrification in SBBR treating low C/N ratio domestic wastewater [J]. CIESC Journal, 2016, 67(11): 4817-4824 (in Chinese).
- [9] PERSSON F, SUAREZ C, HERMANSSON M, *et al.* Community structure of partial nitrification-Anammox biofilms at decreasing substrate concentrations and low temperature [J]. Microbial Biotechnology, 2016, 10: 761-772.
- [10] 李民龙,梁子彦,汪奇欣,等. 不同填充率短程硝化泥膜MBBR微生物特征分析[J]. 环境科学与技术, 2022, 45(10): 106-115.  
LI Minlong, LIANG Ziyan, WANG Qixin, *et al.* Analysis of microbial characteristics in sludge-biofilm hybrid MBBR reactors with different filling rates [J]. Environmental Science & Technology, 2022, 45(10): 106-115 (in Chinese).
- [11] LI J W, PENG Y Z, ZHANG L, *et al.* Quantify the contribution of Anammox for enhanced nitrogen removal through metagenomic analysis and mass balance in an anoxic moving bed biofilm reactor [J]. Water Research, 2019, 160: 178-187.
- [12] 侯锋,王凯军,邵彦青,等. 北京碧水下沉式再生水厂升级改造及生态综合体建设[J]. 中国给水排水, 2017, 33(10): 54-58.  
HOU Feng, WANG Kaijun, SHAO Yanqing, *et al.* Upgrading project of Bishui underground wastewater treatment plant and ecological complex construction [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(10): 54-58 (in Chinese).
- [13] 董洋,汪德金,余波. 多级AO工艺用于全地下式北京碧水污水处理厂升级改造[J]. 中国给水排水, 2018, 34(2): 59-62.  
DONG Yang, WANG Dejin, YU Bo. Application of multi-stage AO process in the upgrading and reforming project in underground Beijing Bishui wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(2): 59-62 (in Chinese).
- [14] 吴淑云,祝贵兵,彭永臻. 分段进水生物脱氮工艺最高脱氮率的探讨[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(4): 594-598.  
WU Shuyun, ZHU Guibing, PENG Yongzhen. Experimental evaluation of nitrogen removal efficiency in step feed biological nitrogen removal process [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(4): 594-598 (in Chinese).
- [15] 沈耀良,王宝贞. 废水生物除磷工艺中聚磷菌的作用机制及运行控制要点[J]. 环境科学与技术, 1995(2): 11-16.

- SHEN Yaoliang, WANG Baozhen. Key points of mechanism and operation control for phosphorus-accumulating bacteria in wastewater biological phosphorus removal process [J]. Environmental Science & Technology, 1995(2): 11-16 (in Chinese).
- [16] 杨敏, 孙永利, 郑兴灿, 等. 回流污泥内碳源反硝化工艺在污水处理厂改造中的应用[J]. 水工业市场, 2014(1): 80-84.
- YANG Min, SUN Yongli, ZHENG Xingcan, *et al.* Application of denitrification process of carbon source in return sludge in sewage treatment plant [J]. Water-Industry Market, 2014(1): 80-84 (in Chinese).
- [17] 王伟, 王淑莹, 孙亚男, 等. 分段进水 A/O 工艺流量分配专家系统的建立与应用[J]. 化工学报, 2008, 59(10): 2608-2615.
- WANG Wei, WANG Shuying, SUN Yanan, *et al.* Establishment and application of influent flow distribution expert system in step-feed A/O process [J]. CIESC Journal, 2008, 59(10): 2608-2615 (in Chinese).
- 作者简介: 张璐晶(1984—), 女, 山东莱州人, 博士, 主要从事城市水环境治理领域研究工作。
- E-mail: zhanglujing@sdic.com.cn
- 收稿日期: 2024-05-11
- 修回日期: 2024-05-12

(编辑: 衣春敏)

## · 信息 ·

## 泾河新城第四污水处理厂(泾河新城工业聚集区污水处理厂)

2021年1月18日, 光伏行业巨头——隆基股份旗下隆基绿能科技股份有限公司落户泾河新城双碳产业园, 建设年产29 GW单晶电池项目, 配套建设泾河新城工业聚集区污水处理厂。该污水处理厂位于西咸新区泾河新城, 主要服务于隆基29 GW单晶电池项目、隆基中央研究院、创维电子等企业。设计总规模 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 其中隆基企业排水 $4.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 其他工业企业排水 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 总投资5.6亿元, 总占地 $5.8 \text{ hm}^2$ (87亩)。该项目建设单位为西咸新区泾河新城产业发展集团有限公司, 勘察单位为陕西西北综勘院技术咨询有限公司, 设计单位为中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 施工单位为中国十七冶集团有限公司陕西西安分公司, 监理单位为众和工程管理有限公司。

该污水处理厂积极探索低碳能源在工业园区中的综合应用, 力争将项目建设成为实用化、规模化、可市场化的低碳能源综合应用示范化工程。利用空置屋顶及水池上方空间建设分布式光伏电站, 可利用面积约 $2.2 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 采用高效单晶硅电池组件, 串联接入组串式逆变器, 将直流电逆变为交流电; 设计使用25年, 建设发电总容量约为1.94 MWp, 年均发电量约为 $183.54 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$ , 年均节省电费为104.78万元。该污水处理厂采用再生水源热泵、光伏发电、储能系统协同提升园区清洁能源利用率。经测算, 项目全部投运后, 年均节约标煤1 113.69 t, 减少二氧化碳排放2 775.87 t、二氧化硫排放83.53 t、氮氧化物41.76 t, 年均节省电费约300万元, 厂区运营电费可降低32%。

(中国市政工程华北设计研究总院有限公司 西安分公司 供稿)