

工程实例

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2024. 14. 015

等污泥负荷不等池容多级AO的设计计算及优势分析

孙事昊¹, 庞洪涛¹, 张璐晶¹, 江乐勇¹, 彭轶², 张亮³,
侯锋¹, 彭永臻³

(1. 信开环境投资有限公司, 北京 101100; 2. 北京信通碧水再生水有限公司, 北京 101100; 3. 北京工业大学 城镇污水深度处理与资源化利用技术国家工程实验室, 北京 100024)

摘要: 多级AO可以充分利用原水中的碳源进行反硝化,已在大量工程实践中得以应用。推导了多级AO的硝化和反硝化基本公式,基于等污泥负荷条件建立了计算公式,并评估了各因素对多级AO硝化和反硝化的影响,给出了提高脱氮效率的途径;建立并分析了基于等污泥负荷的2种设计方法,开发出等污泥负荷不等池容多级AO工艺,该工艺可以发挥多级AO在污泥浓度上的优势,弱化DO对反硝化的抑制影响,克服进水分配的难点。

关键词: 多级AO工艺; 进水分配比; 回流比; 脱氮效率; 污泥负荷; 碳源; 短程硝化反硝化; 计算公式

中图分类号: X703 文献标识码: B 文章编号: 1000-4602(2024)14-0085-10

Design Calculation and Advantage Analysis of Multi-stage A/O Process with Equal Sludge Load and Unequal Volume

SUN Shi-hao¹, PANG Hong-tao¹, ZHANG Lu-jing¹, JIANG Le-yong¹, PENG Yi²,
ZHANG Liang³, HOU Feng¹, PENG Yong-zhen³

(1. Xinkai Environment Investment Co. Ltd., Beijing 101100, China; 2. Beijing Xintong Bishui Reclaimed Water Co. Ltd., Beijing 101100, China; 3. National Engineering Laboratory for Advanced Municipal Wastewater Treatment and Reuse Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100024, China)

Abstract: Multi-stage A/O has been applied in many engineering practices due to full use of the carbon source in raw water for denitrification. In this paper, the basic formulas for the nitrification and denitrification of multi-stage A/O are derived, and the calculation formulas are established based on the equal sludge load principal. The influence of various factors on the nitrification and denitrification is evaluated, and the ways to improve the efficiency of nitrogen removal are deduced. Based on equal sludge load principal, two design methods were established and analyzed, and a novel multi-stage A/O process with equal sludge load and unequal volume was developed, aimed to amplify the advantages in sludge concentration, weaken the inhibition effect of DO on denitrification, and overcome the difficulties of inlet

distribution.

Key words: multi-stage A/O process; influent distribution ratio; reflux ratio; total nitrogen removal efficiency; sludge load; carbon source; short-cut nitrification and denitrification; calculation formula

多级AO工艺通常由2~4级缺氧/好氧顺序排列组成(见图1),回流污泥从首端进入,而污水则按一定比例从每一级的缺氧池(A池)进入,为反硝化提供碳源,紧接着好氧池(O池)完成硝化,硝态氮进入下一级A池与下一级进水中的碳源完成反硝化。在理想状态下,多级AO系统将发生如下反应:第一级缺氧池(A₁池)进入的污水(Q₁)为回流污泥中的硝态氮反硝化提供碳源,剩余的可生物降解COD(BCOD)在第一级好氧池(O₁池)去除,氨氮全部氧化成硝态氮;O₁池出水与A₂池进入的污水(Q₂)混合,进水中的碳源促使O₁池产生的硝态氮被反硝化,剩余的BCOD在O₂池去除,氨氮继续完全氧化;依次发生直至最后一级时,O_{n-1}池出水与A_n池进入的污水Q_n混合,进水中的碳源促使O_{n-1}池产生的硝态氮被反硝化,剩余的BCOD在最后一级O_n池去除,氨氮继续完全氧化为硝态氮排放至二沉池^[1-2]。

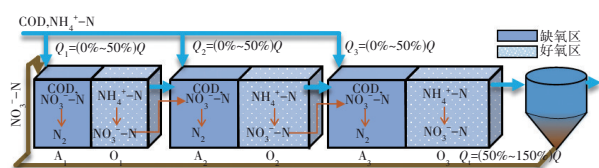


图1 多级AO工艺流程

Fig.1 Flow chart of multi-stage A/O process

多级AO工艺通过分级进水实现了生化单元容积负荷的提升,同时在无需设置内回流的情况下即能实现较高的TN去除率^[3-4],已在大量工程实践中得到应用^[5-7]。Lesouef等^[8]通过仿真研究发现,采用三级进水工艺能够节省20%的水力停留时间。王舜和等^[5]在同一座污水处理厂对比了多级AO、多模式AAO两种不同工艺的运行效果,发现多级AO工艺脱氮效果更优,且停留时间更短,运行电耗更低,具有一定的优势。赵剑强等^[9]建立了以原水碳氮比和反硝化理论碳氮比为核心的多级AO设计计算方法,提供了普适的手段,并从脱氮效率入手分析了不同原水碳氮比对最终脱氮效率的影响,认为按照氮的污泥负荷相等的原则可能更合理。Zhu等^[10]通过ASM建立了多级AO的稳态模型,在等池容不等

进水条件下,得出系列原水水质变化时的最优运行参数,并通过中试验证,得到了较好的试验结果。王伟等^[11-12]研究了在等池容不等进水的设计条件下,实际运行时污泥回流比、进水流量分配比对整体工艺脱氮性能的影响,提出了多级AO工艺在运行时的调控策略,取得了较好的效果。

然而,多级AO是一个较为复杂的活性污泥系统,关于硝化反硝化的基本公式推导和设计方法仍欠缺,常见的等池容不等进水设计和运行方法并不能适用于所有情景。

笔者基于等污泥负荷原则分析了多级AO的硝化性能,基于进水C/N比和反硝化所需的C/N比分析了多级AO的反硝化性能,并基于等污泥负荷原则提供了2种设计方法,提出不等池容多级AO工艺,分析了其在脱氮方面的优势。

1 多级AO基本公式

1.1 各池的污泥浓度、容积负荷

在多级AO系统中,由于原水分散进入反应系统,因此系统各级悬浮固体浓度(MLSS)并不相同,将导致各级F/M值、C/N值、氮负荷出现不同,且计算较为复杂。

设一个多级AO有n级,总进水流量为Q,各级进水比 $Q_1:Q_2:\cdots:Q_i:\cdots:Q_n=\alpha_1:\alpha_2:\cdots:\alpha_i:\cdots:\alpha_n$,污泥回流比为R, $R=\text{污泥回流量}(Q_R)/Q$ 。因系统物质平衡,每一级的污泥浓度可表示为:

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

式中: X_i 为第*i*级的污泥浓度; X_R 为二沉池回流污泥的污泥浓度; α_t 为第*t*级进水的比例。

以图1中A₁池为例,计算池体的容积负荷。该池体共有2组进水,分别为进水Q₁、污泥回流Q_R。计算第一级物质c的容积负荷($F_{1,c}$):

$$F_{1,c} = Q(\alpha_1 + R) \times [(C_{in,c} \times \alpha_1 + C_{ef,c} \times R) / (\alpha_1 + R)] \times V_1^{-1} \quad (2)$$

式中: $F_{1,c}$ 为物质c在A₁池的容积负荷; $C_{in,c}$ 为进

水中物质c的质量浓度; $C_{ef,c}$ 为出水中(同样是回流中)物质c的质量浓度; α_1 为第一级进水的比例; V_1 为第一级 A_1 池体积。

1.2 硝化性能基本公式

依据式(2),计算第一级好氧池(O_1)的氨氮容积负荷:

$$F_{O_1, NH_4^+ - N} = [Q(\alpha_1 + R)] \times [(C_{in, NH_4^+ - N} \times \alpha_1 + C_{ef, NH_4^+ - N} \times R) / (\alpha_1 + R)] \times V_{O_1}^{-1} \quad (3)$$

式中: $F_{O_1, NH_4^+ - N}$ 为 O_1 池的氨氮容积负荷; V_{O_1} 为 O_1 池体积; $C_{in, NH_4^+ - N}$ 为进水中 $NH_4^+ - N$ 的质量浓度; $C_{ef, NH_4^+ - N}$ 为出水中(同样是回流中) $NH_4^+ - N$ 的质量浓度。

在目前较为严格的出水标准要求下,出水氨氮值($C_{ef, NH_4^+ - N}$)通常为1.5 mg/L,再考虑到污水处理厂的内控 $C_{ef, NH_4^+ - N}$ 指标可能更低,故式(3)中 $C_{ef, NH_4^+ - N} \times R$ 相对于 $C_{in, NH_4^+ - N} \times \alpha_1$ 可忽略不计,因此式(3)简写并约分后得:

$$F_{O_1, NH_4^+ - N} = [Q(\alpha_1 + R)] \times [(C_{in, NH_4^+ - N} \times \alpha_1) / (\alpha_1 + R)] \times V_{O_1}^{-1} = \frac{\alpha_1}{V_{O_1}} \times C_{in, NH_4^+ - N} \times Q \quad (4)$$

对于 O_1 池而言,代入式(1)、(4)后,硝化污泥负荷的计算公式为:

$$\frac{F_{O_1, NH_4^+ - N}}{X_1} = \frac{\alpha_1}{V_{O_1}} \times \frac{R + \alpha_1}{R \times X_R} \times C_{in, NH_4^+ - N} \times Q \quad (5)$$

同理,理想状态下每一级均应完成该级进水中氨氮的硝化^[1],即,每一级的出水氨氮浓度均较低,可忽略不计。与式(5)同理,对于第*i*级好氧池(O_i)硝化污泥负荷,在代入式(1)后可表示为:

$$\frac{F_{O_i, NH_4^+ - N}}{X_i} = \frac{\alpha_i}{V_{O_i}} \times \frac{R + \sum_{t=1}^i \alpha_t}{R \times X_R} \times C_{in, NH_4^+ - N} \times Q \quad (6)$$

其中, $\sum_{t=1}^n \alpha_t = 1$ 。

1.3 反硝化性能基本公式

反硝化性能计算较复杂,还需要考虑进水C/N值高低。多级AO的最大反硝化率发生在各级池体均硝化完全且原水C/N比值满足所有反硝化所需碳源时^[1],此时出水总氮由最后一级进水总氮产生,且

出水总氮仅为硝态氮,因此最大反硝化率为:

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{\alpha_n}{1 + r_n + R} \quad (7)$$

式中: η_{\max} 为最大反硝化率; α_n 为最后一级进水占总进水的比例; r_n 为最后一级混合液回流比(若有)。

当考虑进水C/N对反硝化的影响时,需考虑BCOD浓度是否足以完成反硝化。假设每一级的BCOD均在该级缺氧池反硝化和好氧池曝气中被完全消耗,则每一级BCOD浓度为:

$$C_{i, BCOD} = \frac{\alpha_i}{\sum_{t=1}^i \alpha_t + R} \times C_{in, BCOD} \quad (8)$$

式中: $C_{i, BCOD}$ 为第*i*级的BCOD浓度; $C_{in, BCOD}$ 为进水BCOD浓度。

当假设每一级硝化均完全时,下一级的硝态氮全部来源于上一级的硝化产物,因此对于每一级而言(第一级除外),其硝态氮浓度可表示为:

$$C_{i, NO_3^- - N} = \frac{\alpha_{i-1}}{\sum_{t=1}^i \alpha_t + R} \times C_{in, TKN}, \quad i \neq 1 \quad (9)$$

式中: $C_{i, NO_3^- - N}$ 为第*i*级的 $NO_3^- - N$ 浓度; $C_{in, TKN}$ 为进水中总凯氏氮浓度。

在缺氧池中,其 $C_{i, BCOD}/C_{i, TKN}$ 应该大于单位硝态氮($NO_3^- - N$)全部转化为氮气所需的C/N。此时,假设 $\tau = BCOD_{\text{所需}}/NO_3^- - N$,表示的意义为:对于某特定的污水,单位 $NO_3^- - N$ 全部转化为氮气所需的BCOD。 τ 值只能通过实验确定,且对于每种不同的污水其 τ 值均不一样。按照反硝化公式, τ 值应为2.87,但对于实际污水,其COD的含量成分比较复杂,反硝化的环境因素也复杂,实际的 τ 值会比2.87大。一般来说,实际污水 τ 值的范围为4~9^[12-13]。

假设第*i*级(第一级除外)缺氧池的BCOD浓度刚好满足反硝化所需,将 $C_{i, BCOD}/C_{i, NO_3^- - N} = \tau$ 代入式(8)、(9)得:

$$\frac{\alpha_i}{\alpha_{i-1}} \times \frac{C_{in, BCOD}}{C_{in, TKN}} = \tau, \quad i \neq 1 \quad (10)$$

定义原污水中BCOD与TKN的浓度比值为 σ (即 $\sigma = C_{in, BCOD}/C_{in, TKN}$),代入式(10)后,整理可得:

$$\frac{\alpha_{i-1}}{\alpha_i} = \frac{\sigma}{\tau}, \quad i \neq 1 \quad (11)$$

对于第一级缺氧池而言,污泥回流会带回硝态

氮,该部分硝态氮的浓度等于最后一级好氧池的出水硝态氮,在没有内回流并同样认为硝化全部完全的情况下,该硝态氮浓度为:

$$C_{1,NO_3-N} = \frac{\alpha_n}{1+R} \times C_{in,TKN} \times \frac{R}{\alpha_1 + R} \quad (12)$$

当第一级进水BCOD正好完成污泥回流带回硝态氮的反硝化时,需 $C_{1,BCOD}/C_{1,NO_3-N} = \tau$,代入式(8)、(12)得:

$$\frac{\alpha_n}{\alpha_1} \times \frac{R}{1+R} = \frac{\sigma}{\tau} \quad (13)$$

实际上,式(13)中 $\frac{\alpha_n}{\alpha_1} \times \frac{R}{1+R}$ 与 $\frac{\sigma}{\tau}$ 大小关系反映的是第一级进水比例是否满足污泥回流中硝态氮反硝化的碳源需求量: $\frac{\alpha_n}{\alpha_1} \times \frac{R}{1+R} \leq \frac{\sigma}{\tau}$ 则说明满足, $\frac{\alpha_n}{\alpha_1} \times \frac{R}{1+R} > \frac{\sigma}{\tau}$ 则说明不满足。

对于某特定污水来讲, τ 、 $C_{in,BCOD}$ 、 $C_{in,TKN}$ 均是定值,因此式(11)中 α_{i-1}/α_i 为定值。定义 δ 为进水分配系数,代表每个上一级与下一级进水的比例,计算式如下:

$$\delta = \frac{\alpha_{i-1}}{\alpha_i} = \frac{\sigma}{\tau} \quad (14)$$

进水分配系数 δ 对于多级AO是非常重要的设计参数,在祝贵兵^[1]、王伟等^[12,14]、赵剑强等^[9]的论文中都有论述,笔者将在后续的论证中继续深入讨论 δ 的意义和应用。

2 等污泥负荷分配法计算公式

2.1 计算进水分配比及好氧池池容比

首先论证为何需要“等污泥负荷”:

① 当后一级好氧区硝化菌 F/M 值高于前一级硝化菌 F/M 值时,后端的硝化面临较大考验,可能出现硝化不完全状态,出水氨氮超标,且氨氮会通过污泥回流至系统内不断积累,导致式(2)中的 $C_{ef,NH_4^+-N} \times R$ 越来越大,整个系统可能出现崩溃的现象。在系统处于高负荷状态时,这种负面影响将变得更加明显。

② 当前一级好氧区硝化菌 F/M 值高于后一级硝化菌 F/M 值时,意味着前端进水多、后端进水少,此时前段硝化容积负荷、污泥负荷均较高,可能硝化不完全,前一级氨氮会积累至后一级。祝贵兵^[1]对硝化负荷及硝化速率的试验证明,硝化速率随着硝化污泥负荷和容积负荷的减少而降低。这说明,

后一级硝化负荷降低、硝化速率降低,积累的氨氮也会难以完全硝化,导致出水氨氮超标。

王伟等^[14]对不等污泥负荷的分配方法进行了验证,试验结果证明:在不等污泥负荷时,无论前端负荷大还是后端负荷大,对氨氮的去除均有负面影响。因此,最利于硝化的分配方法应为各级之间的 F/M 值相等,即“等污泥负荷”。也就是说,等污泥负荷原则利于多级AO的硝化性能发挥。

依据等污泥负荷条件,控制各级好氧区硝化的 F/M 值相等时,则有:

$$\frac{F_{1,NH_4^+-N}}{X_1} = \frac{F_{i,NH_4^+-N}}{X_i} \quad (15)$$

利用多级AO硝化性能的基本公式,将式(5)、(6)代入式(15),约分同类项后可得方程组1:

$$\text{方程组 1:} \begin{cases} \frac{\alpha_1(R + \alpha_1)}{V_{O_1}} = \frac{\alpha_i(R + \sum_{t=1}^i \alpha_t)}{V_{O_i}} & \text{①} \\ \sum_{i=1}^n \alpha_i = 1 & \text{②} \end{cases}$$

方程组1中,如果给定污泥回流比 R 的参数,可以推导出进水分配比例 α_i 和好氧池池容 V_{O_i} 之间的关系,该方法有利于多级AO发挥硝化性能。

2.2 计算污泥回流比和缺氧池HRT比例

由于方程组1无法确定污泥回流比 R 及缺氧池参数,因此引入多级AO反硝化性能基本公式,以期获得硝化与反硝化性能的共同提高。

首先推导污泥回流比 R 的计算,联立式(11)、(13)可得方程组2:

$$\text{方程组 2:} \begin{cases} \frac{\alpha_{i-1}}{\alpha_i} = \frac{\sigma}{\tau} & \text{③} \\ \frac{\alpha_n}{\alpha_1} \times \frac{R}{1+R} = \frac{\sigma}{\tau} & \text{④} \end{cases}$$

由方程组2可推算出污泥回流比 R 的计算公式为:

$$R = \frac{(\sigma/\tau)^n}{1 - (\sigma/\tau)^n}, \quad R > 0 \quad (16)$$

由方程组2及式(16),按照 σ 和 τ 大小关系,分情况推论^[3-4,15]:

① 当 $\sigma \geq \tau$ 时,也就是进水实际的BCOD/TKN值 \geq 反硝化所需BCOD/TKN值(即碳源充足),式(16)无解、 R 无法求得;方程组2中③式 $\alpha_{i-1}/\alpha_i > 1$,表明后一级进水比例小于前一级进水比例,也就是

说进水比例逐级减小。此时 R 值无解代表的含义是第一级的进水碳源足以完成污泥回流带回的硝态氮的反硝化,即式(13)或方程组2中④式满足左边 $(\frac{\alpha_n}{\alpha_1} \times \frac{R}{1+R}) \leq \text{右边}(\frac{\sigma}{\tau})$ 。此时,可优先通过满足二沉池回流污泥浓度的公式来选择 R 值,一般 R 取值为0.5~1.5。

② 当 $\sigma < \tau$ 时,也就是进水实际的BCOD/TKN值<反硝化所需BCOD/TKN值时(即碳源不足),通过式(16)求得 R 值; $\alpha_{i-1}/\alpha_i < 1$,表明后一级进水比例大于前一级进水比例,也就是说进水比例逐级升高。

③ 当 $\sigma < \tau$ 时,将满足式(16)的 R 值取为 R' ,若 $R > R'$,则第一级进水碳源无法完成污泥回流带回的硝态氮的反硝化,硝态氮有剩余,该部分硝态氮将积累至后续反应池,后续的缺氧池只能完成前一级好氧池产生硝态氮的反硝化而无法完成被积累硝态氮的反硝化,因而继续提高 R 值也无法提高系统的脱氮效率;若 $R < R'$,则第一级进水碳源有剩余, R 不断提高,系统脱氮率不断提高,直至 $R=R'$ 时达到最高值。

④ 进水BCOD/TKN比是不断变化的,将设计时选择的进水BCOD/TKN定义为 σ_i ,由 σ_i 求得的 R 值定义为 R_i 。当实际 $\sigma > \sigma_i$ 时,设计值 R_i 相较于实际情况偏小,第一级进水碳源有剩余;当实际 $\sigma < \sigma_i$ 时,设计值 R_i 相较于实际情况偏大,第一级硝态氮有剩余。

因 R 值的选取受到 σ 值、 τ 值的影响,进水BCOD/TKN值(σ 值)处于不断变换中, R 值的确认变得困难(后续2.4节将给出一种可接受的确定方法)。一般而言,为提高原水碳源的利用, R 值选择应尽量偏保守取值。

计算并调整得到 R 值,代入方程组2,可推导出进水分配比和缺氧池池容比之间的关系,或理解为推算出各级缺氧池的水力停留时间之间的关系式:

$$\frac{(\text{HRT}_A)_{i-1}}{(\text{HRT}_A)_i} = \frac{\sigma}{\tau} \quad (17)$$

式中: $(\text{HRT}_A)_i$ 为第 i 级缺氧池的水力停留时间。

此时,再将 R 值代入方程组1,可求得进水分配 α_i 和好氧池 V_{oi} 之间的关系。

这里需要说明,好氧池、缺氧池之间的设计参

数选择可能会出现冲突,本质问题是按照进水水质计算的反硝化与反硝化的假设不一定完全匹配。此时,应按照优先顺序选择优先保障硝化或优先保障反硝化进行设计计算;如果是针对已建成的工程项目进行优化,进水分分配比、污泥回流比就是有力的工具。

2.3 进水分分配系数

进水分分配系数 δ 反复出现在多级AO的基本公式中,尤其是与反硝化相关的计算公式中,它反映了在反硝化最优的设计思路下,每个前一级与后一级的进水流量的比例是定值($\alpha_{i-1}/\alpha_i = \delta$),对于设计和运行都有着重要意义。

① 进水分分配系数反映进水碳源充足率

由 σ 、 τ 的定义不难发现:

$$\delta = \frac{\sigma}{\tau} = \frac{C_{\text{in,BCOD}}/C_{\text{in,TKN}}}{C_{\text{理论,BCOD}}/C_{\text{in,NO}_3^- - \text{N}}} = \frac{C_{\text{in,BCOD}}/C_{\text{in,TKN}}}{C_{\text{理论,BCOD}}/C_{\text{in,TKN}}} \quad (18)$$

也就是说, δ 反映了原水碳源对于反硝化所需碳源的达到率,可称作“进水碳源充足率”。

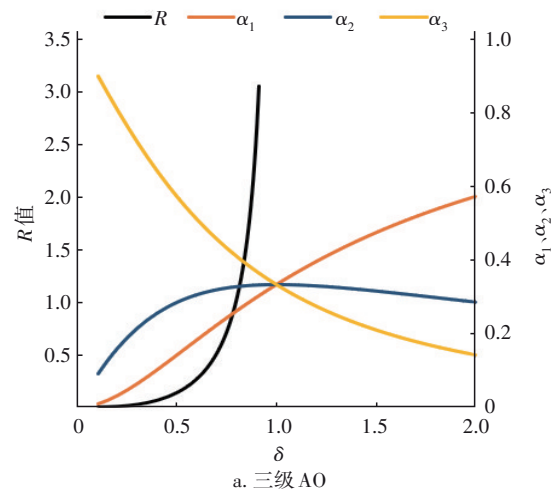
② 进水分分配系数对每一级进水比例的影响

由式(11)、(14)可以求出 α_i 与 δ 的关系式:

$$\alpha_i = \frac{\delta^{n-i}}{\sum_{i=0}^{n-1} \delta^i} = \frac{\delta^{n-i}}{1 + \delta + \delta^2 + \dots + \delta^{n-1}} \quad (19)$$

其中, $0 < i \leq n$ 。

式(19)反映了多级AO反硝化最优时的情况,依据式(16)、(19)可以列举 $n=3$ 和4时(即三级AO和四级AO)的污泥回流和进水分分配关系,具体如图2所示。



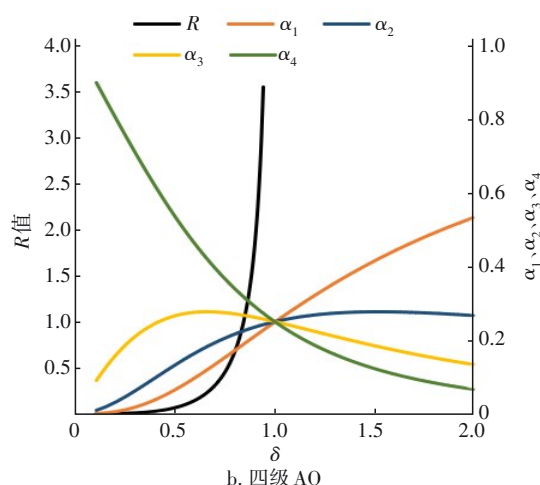


图2 最优进水分配系数与污泥回流、进水分配比例的关系
Fig.2 Relationship between optimal influent distribution coefficient and sludge reflux and influent distribution ratio

③ 进水分配系数对最大脱氮效率的影响

当不考虑最后一级内回流 r_n 时,将式(16)、(19)代入式(7),可得:

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{\alpha_n}{1+R} = 1 - \frac{1-\delta^n}{\sum_{i=0}^{n-1} \delta^i} = \delta \quad (20)$$

其中, R, α_i 满足方程组2。

由式(20)可知,当 R 值满足式(16)(即 $R=R'$)、 α_i 值满足式(19)、每一级硝化完全、每一级反硝化完全时,系统的最大脱氮效率就等于进水分配系数 δ (进水碳源充足率),而与级数 n 无关。

2.4 污泥回流比对脱氮效率的影响

当不考虑最后一级的内回流情况时,污泥回流比 R 对于脱氮效率 η 的影响可按照下式理解,将式(19)代入式(7)可得:

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta = 1 - \frac{\alpha_n}{1+R} = 1 - \frac{1}{1+R} \times \frac{1}{1+\delta^1+\delta^2+\dots+\delta^{n-1}}, \quad R < R' \\ \eta = \delta, \quad R \geq R' \end{array} \right. \quad (21)$$

依据式(21)可以列举 $n=3$ 和4时(即三级AO和四级AO) R 对于 η 的影响,如图3所示。由图3可以推定一些数值和变化关系:当 $\delta < 0.7$ 时, R 值只要大于52%(三级AO)、32%(四级AO),对于 η 的影响较小;当 $\delta > 0.9$ 时, R 值在常规的回流比 $[0.5, 1.3]$ 区间内变化并不显著;只有当 δ 值处于 $[0.7, 0.9]$ 区间时, R 值在 $[0.5, 1.3]$ 区间内的变化对于脱氮效率 η 影响是较大的。这说明,当碳源不充足时,一味提

高污泥回流比并不一定有利于反硝化。在设计或运行优化时,可以根据进、出水TN求得 η ,从图3中寻找合适的 R 值。

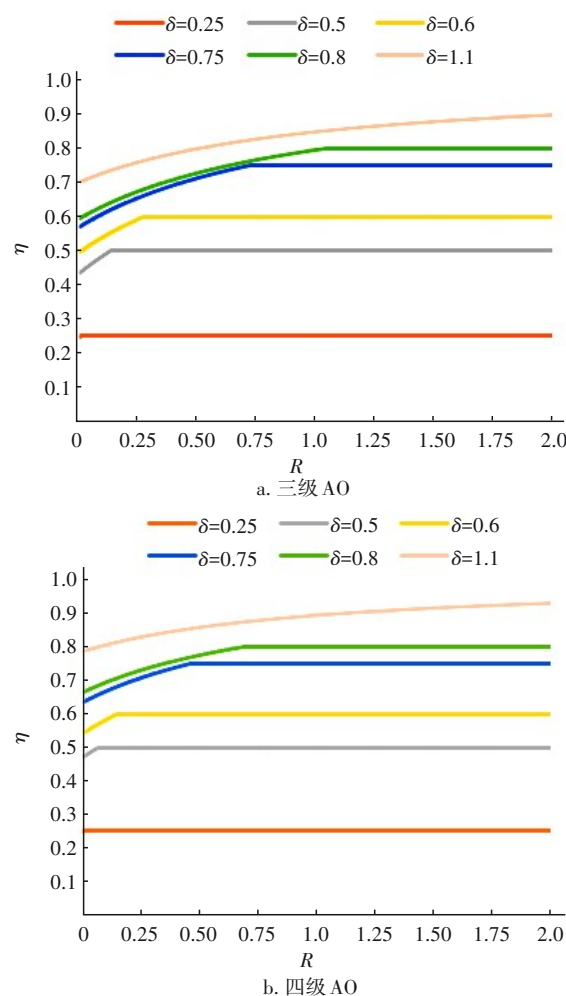


图3 污泥回流比 R 与系统脱氮效率 η 的关系
Fig.3 Relationship between sludge reflux ratio and nitrogen removal efficiency

2.5 提高反硝化性能的方法

由2.2节~2.4节的分析可知, R, α_i 的取值对系统的脱氮效率 η 有一定影响,但更为关键的是,进水碳氮比 σ 值反映了污水是否可以完全地进行自行脱氮的能力, δ 作为“进水碳源充足率”才是表征系统最大反硝化率的核心因素。多级AO的参数调整并不能再提高系统的理论最大反硝化率,这对于一个多级AO工艺的设计和运行优化而言是非常重要的原则。

对于固定项目,其进水水质无法在厂内调控,因此提高 σ 值、减小 τ 值是可行的方法。

① 提高 σ 值

投加外碳源可以提高 σ 值。另外,近年来已有报道通过“内碳源反硝化”技术提高系统脱氮能力。某项针对AAO工艺的改进中,在生化池前设置内碳源反硝化池,利用回流污泥的高污泥浓度实现了内碳源反硝化^[16]。假设通过内碳源反硝化贡献了额外10%的TN去除,那么 δ 值可以扩大1.1倍。

② 减小 τ 值

按照传统的全程硝化-全程反硝化公式推算 τ 值理论值应为2.87,但实际上大多数污水 τ 值远远大于此值。新型的脱氮理论可以支持减小 τ 理论值,进而降低实际污水 τ 值:例如短程硝化反硝化、同步硝化反硝化、短程硝化耦合厌氧氨氧化、短程反硝化耦合厌氧氨氧化等,这些脱氮途径可以有力减少反硝化对COD的需求程度。

短程硝化反硝化可以节省40%碳源^[17],若一个多级AO系统所有的TN去除均通过短程硝化反硝化完成,则 δ 值可以扩大 $1/0.6=1.67$ 倍,反硝化性能将提高1.67倍;若30%的TN去除通过短程硝化反硝化完成,则 δ 值可以扩大 $1/(0.7 \times 1 + 0.3 \times 0.6)=1.14$ 倍。一项耦合了短程硝化技术的多级AO系统试验数据^[17]表明,系统的短程硝化率由15%提高至90%时,系统TN去除率提高了12%。

③ 综合提高 δ 值

通过以上方法,可以看出提高系统反硝化性能的核心仍然是提供额外的碳源和耦合新型脱氮途径,假设综合两种方法:通过内碳源反硝化,贡献了约10%的TN去除;通过短程硝化反硝化,贡献了30%的TN去除,那么此时多级AO系统 δ 值可以扩大 $1.1 \times 1.14=1.25$ 倍。

2.6 基于等负荷分配法的多级AO两种设计方法

给定污泥回流比 R 即可得到好氧池池容比、进水分配比。下面采用三级AO示例等负荷分配法,提供两种常见的多级AO设计计算方法。

① 等池容不等进水分配设计方法

当 $V_{O1}:V_{O2}:V_{O3}=1:1:1$ 时,方程组1的①式中 V 可约去;当取 R 为不同值时,进水分配比均可计算求得,这里列举 R 分别取0.5、0.75、1.0时的进水分配比:① $R=0.50$ 时, $\alpha_1:\alpha_2:\alpha_3=1.62:1.23:1$;② $R=0.75$ 时, $\alpha_1:\alpha_2:\alpha_3=1.52:1.19:1$;③ $R=1.00$ 时, $\alpha_1:\alpha_2:\alpha_3=1.43:1.14:1$ 。

② 不等池容等进水分配设计方法

当 $\alpha_1:\alpha_2:\alpha_3=1:1:1$ 时, V_{O1},V_{O2},V_{O3} 不相等,方程组1中 V 无法约去,则此方程组为三元四次方程,不存在解析解,需采用递归法求特殊解。此处列举 R 分别取0.5、0.75、1.0时的进水分配比:① $R=0.50$ 时, $V_{O1}:V_{O2}:V_{O3}=1:1.40:1.80$;② $R=0.75$ 时, $V_{O1}:V_{O2}:V_{O3}=1:1.31:1.62$;③ $R=1.00$ 时, $V_{O1}:V_{O2}:V_{O3}=1:1.25:1.50$ 。此时,再根据反硝化速率计算出缺氧池容积,或者依据设计手册选定缺/好氧池比例,即可完成脱氮性能设计。

2.7 不等池容多级AO的优势

笔者已依据多级AO基本公式推导出系统的等污泥负荷设计思路,并提供了不等进水等池容多级AO和等进水不等池容多级AO的两种设计方法。其中,等进水不等池容多级AO的优势主要体现在以下4个方面:

① 污泥浓度更具优势

在多级AO工艺中,同样的池容条件下,生化池中储存的污泥浓度比AAO类工艺要高。假设最后一个O池进入二沉池的MLSS取固定值、污泥回流均为75%(也就是说二沉池的水力负荷、固体负荷均相同),并且忽略污泥的吸附、代谢、衰减等变化,依据式(1)和2.6节可计算,等池容三级AO、不等池容三级AO、AAO工艺污泥浓度分别见表1。

表1 各级污泥浓度及平均污泥浓度对比($R=0.75$)

Tab.1 Comparison of sludge concentration at all levels and average sludge concentration ($R=0.75$)

mg·L⁻¹

O ₃ 池 MLSS	平均 MLSS		
	等池容三级AO	不等池容三级AO	AAO
3 000	3 691	3 705	3 000
3 500	4 306	4 323	3 500
4 000	4 921	4 940	4 000
4 500	5 537	5 558	4 500
5 000	6 152	6 175	5 000
5 500	6 767	6 793	5 500

由表1可知,在假设运行条件下,三级AO平均污泥浓度是AAO的1.2~1.5倍,不等池容三级AO相较于等池容三级AO也要高出0.5%左右。污泥浓度提高0.5%,同样等于硝化菌数量也高出0.5%,这将有利于系统的硝化性能发挥。

若仅针对A₁池分析,两种多级AO的污泥浓度分别见表2。

表2 A_1 池污泥浓度及平均污泥浓度对比($R=0.75$)
Tab.2 Comparison of sludge concentration and average sludge concentration in A_1 tank ($R=0.75$)

O_3 池 MLSS	A_1 池 MLSS	
	等池容三级AO	不等池容三级AO
3 000	4 527	4 846
3 500	5 282	5 654
4 000	6 036	6 462
4 500	6 791	7 269
5 000	7 545	8 077
5 500	8 300	8 885

由表2可知,在这样的运行工况下,不等池容三级AO的 A_1 池MLSS相较于等池容三级AO要高出7%左右。对反硝化而言,已有的内碳源反硝化改造案例^[16]说明高污泥浓度有促进作用:在内碳源反硝化池设计进水比例0%、污泥回流比100%、回流MLSS为7 000~8 000 mg/L、停留时间为3.2 h的情况下,该池进水硝态氮浓度(即回流污泥带来的硝态氮浓度)为12.2 mg/L,出水可以达到0.5 mg/L。据此推测, A_1 池更高的污泥浓度将有利于缺氧池实现一部分内碳源反硝化,提高反硝化性能。

综上,无论对于硝化、反硝化性能,不等池容多级AO在污泥浓度方面均更具优势。

② 弱化DO对反硝化抑制的优势

多级AO运行中,上一级O池出水直接进入下一级A池,那么上一级O池的DO值必然会对下一级A池的反硝化造成抑制。按照每1 mg DO需要消耗0.87 mg COD^[18-19]来换算,对于等池容三级AO、不等池容三级AO而言,其DO影响及被消耗的COD见表3。

表3 A_2 池、 A_3 池的DO影响及被消耗的COD($R=0.75$)

Tab.3 DO effect and COD consumed in A_2 tank and A_3 tank ($R=0.75$)

O_1 池、 O_2 池末端的DO假设值	等池容三级AO			不等池容三级AO		
	A_2 池起始DO	A_3 池起始DO	因DO消耗COD	A_2 池起始DO	A_3 池起始DO	因DO消耗COD
2.0	1.57	1.69	2.84	1.53	1.62	2.74
2.5	1.96	2.11	3.54	1.91	2.02	3.42
3.0	2.35	2.54	4.25	2.29	2.43	4.11
3.5	2.74	2.96	4.96	2.68	2.83	4.79
4.0	3.13	3.38	5.67	3.06	3.24	5.48

由表3可知,不等池容三级AO可以减小上一级

O池的DO对下一级缺氧池的影响,在原水COD利用率方面具有优势。

③ 进水分配比调控优势

由前述分析可知,进水分配 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_n$ 对于多级AO而言具有重要的意义,因此工程上均需对进水流量或分配比的检测和调节进行特殊的设计。例如,青岛城阳某污水处理厂的多级AO设计^[6]采用管道进水的模式;天津市张贵庄污水处理厂的多级AO设计^[20]中,为便于准确地调节进水流量,采用管道进水的方式,并在每级进水管设有流量计和调节阀。

相较于等池容多级AO的进水分配比,不等池容多级AO采用每一级进水均相等的方式,在工程上更具备便捷性。北京碧水下沉式再生水厂采用不等池容等进水分配三级AO^[21]的形式,在运行中表现出较好的性能。

④ 最后一级内回流反硝化性能的促进优势

由式(7)可知,最后一级设置内回流可以提高系统的最大反硝化率,但需要保证最后一级进水完成反硝化后仍有COD剩余;或者,通过投加外碳源至最后一级A池来实现。

由前述分析可知,不等池容三级AO的最后一级池容,相较于等池容三级AO更大,提供了更长的反硝化时间。当然,最后一级更长的O池也提供了可控的优势。

3 结语

讨论了多级AO硝化和反硝化的基本公式,推导出多级AO的设计计算公式和方法,并基于等污泥负荷分配建立了两种设计方法,开发不等池容多级AO工艺并进行了优势分析,可实现较高的原水碳源利用率、可观的内碳源反硝化性能、较低的DO对反硝化抑制影响,当设置最后一级内回流时也可提供更长的反硝化时间,提高系统的硝化和反硝化性能。

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] 曹贵华. 改良A²O分段进水工艺处理低C/N市政废水的性能与优化控制[D]. 北京:北京工业大学, 2013.
CAO Guihua. Performance and Optimization Control on Modified A²O Step-feed Process Treating Low C/N Municipal Wastewater[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2013(in Chinese).
- [3] GE S J, PENG Y Z, WANG S Y, *et al.* Enhanced nutrient removal in a modified step feed process treating municipal wastewater with different in flow distribution ratios and nutrient ratios[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101: 9012-9019.
- [4] ZHU G B, PENG Y Z, ZHAI L M, *et al.* Performance and optimization of biological nitrogen removal process enhanced by anoxic/oxic step feeding[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2009, 43: 280-287.
- [5] 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).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] LESOUF A, PAYRAUDEAU M, ROGALLA F, *et al.* Optimizing nitrogen removal reactor configurations by on-site calibration of the IAWPRC activated sludge model[J]. *Water Science and Technology*, 1992, 25: 105-123.
- [9] 赵剑强,胡博,陈莹. 分段进水A/O工艺的一些关系式[J]. *环境工程学报*, 2010, 4(11): 2532-2536.
ZHAO Jianqiang, HU Bo, CHEN Ying. Some relation equations for step-feed anoxic/oxic process[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, 4(11): 2532-2536(in Chinese).
- [10] ZHU G B, PENG Y Z, WANG S Y, *et al.* Development and experimental evaluation of a steady-state model for the step-feed biological nitrogen removal process [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2007(3): 411-417.
- [11] 王伟,彭永臻,孙亚男. 污泥回流比对分段进水A/O生物脱氮工艺的影响[J]. *中国环境科学*, 2008(2): 116-120.
WANG Wei, PENG Yongzhen, SUN Yanan. The influence of sludge recycle ratio on the step-feed A/O biological nitrogen removal process [J]. *China Environmental Science*, 2008(2): 116-120(in Chinese).
- [12] 王伟,王淑莹,孙亚男,等. 流量分配对分段进水A/O工艺脱氮性能的影响[J]. *环境科学*, 2009, 30(1): 96-101.
WANG Wei, WANG Shuying, SUN Yanan, *et al.* Effects of influent flow distribution ratio on nitrogen removal in step-feed A/O process [J]. *Environmental Science*, 2009, 30(1): 96-101(in Chinese).
- [13] 王伟,王淑莹,孙亚男,等. 多段A/O工艺流量及体积分配方法与优化控制策略[J]. *北京工业大学学报*, 2009, 35(2): 240-245.
WANG Wei, WANG Shuying, SUN Yanan, *et al.* Distribution methods of influent flows and volume in multi-stages A/O process and its optimization [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2009, 35(2): 240-245(in Chinese).
- [14] 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(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(10): 2608-2615(in Chinese).
- [15] FUJII S. Theoretical analysis on nitrogen removal of the step-feed anoxic-oxic activated sludge process and its application for the optimal operation[J]. *Water Science and Technology*, 1996, 34: 459-456.
- [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] WANG X L, MA Y, PENG Y Z, *et al.* Short-cut nitrification of domestic wastewater in a pilot-scale A/O nitrogen removal plant [J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2007, 30: 91-97.
- [18] 王燕,李激,支尧,等. 新型生物质碳源强化脱氮效果及微生物菌群分析[J]. 环境工程, 2022, 40(9): 63-68, 117.
- WANG Yan, LI Ji, ZHI Yao, *et al.* Denitrification enhancement effect and microbial flora analysis of a new biomass carbon source [J]. Environmental Engineering, 2022, 40(9):63-68,117(in Chinese).
- [19] 王伟,彭永臻,王海东,等. 溶解氧对分段进水生物脱氮工艺的影响 [J]. 中国环境科学, 2006 (3): 293-297.
- WANG Wei, PENG Yongzhen, WANG Haidong, *et al.* The effect of dissolved oxygen on the lab-scale step-feed biological nitrogen removal process [J]. China Environmental Science, 2006 (3): 293-297 (in Chinese).
- [20] 王舜和,郭淑琴. 天津市张贵庄污水处理及再生利用一期工程设计[J]. 中国给水排水, 2013,29(8):52-55, 59.
- WANG Shunhe, GUO Shuqin. Design of first-phase project for wastewater treatment and reclamation at Tianjin Zhangguizhuang [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(8):52-55,59(in Chinese).
- [21] 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).

作者简介:孙事昊(1991-),男,山西太谷人,博士,高级工程师,主要研究方向为污水脱氮与生物除臭。

E-mail:ssh_fire@163.com

收稿日期:2023-09-11

修回日期:2024-02-23

(编辑:衣春敏)

·论文预告·

生物膜强化多级AO工程智能设计与运行

不等比池容型多级AO是工程应用中常常面临的实际情况,基于此的进水分配比、污泥回流比是核心的调控手段。投加生物膜填料,生物膜强化多级AO工艺可以耦合多种脱氮途径,进一步提高工艺的脱氮性能,协同提高生物除磷能力。海南某下沉式再生水厂的生化段,选择了生物膜强化多级AO工艺,在智能设计工具的加持下,生化池的脱氮除磷表现高效稳定。2个月的运行监测结果显示,生化段出水氨氮均值小于0.5 mg/L、总氮均值小于5.0 mg/L、总磷均值小于0.3 mg/L,达到了极佳的氮磷协同处理效果。该工程的设计运行为生化极限脱氮与氮磷协同处理提供了良好的工程示范。有关该成果的论文将在《中国给水排水》2024年第18期发表,题目:生物膜强化多级AO工程智能设计与运行,作者:张璐晶、江乐勇、庞洪涛、孙舒祺、彭永臻、侯锋、孙事昊、杨慎华、刘成军、马斌。

欢迎关注!

(本刊编辑部)