

# 泥龄对反硝化除磷脱氮系统效率的影响分析

常 飞<sup>1</sup>, 操家顺<sup>1</sup>, 徐 续<sup>1</sup>, 彭汉寿<sup>2</sup>

(1. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098;

2. 张家界市环境保护局, 湖南 张家界 416600)

**摘要:** 反硝化除磷脱氮系统中, 生物脱氮与生物除磷是两个相互独立、相互竞争又相互交叉的生理反应过程, 存在着硝化菌与聚磷菌的不同泥龄之争。应用数学模式分析了泥龄对氮、磷去除效率的影响, 并就反硝化除磷脱氮工艺的单、双级污泥系统的泥龄进行了探讨。推导出以下结论: 缩短泥龄可以提高系统的同化除磷能力, 长泥龄的生物除磷系统单靠生物作用以期达到完全除磷是几乎不可能的。

**关键词:** 反硝化除磷; 污泥龄; 剩余污泥量; 产率系数

**中图分类号:** X703      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1004-693X(2004)05-0029-04

随着水体富营养化的加剧, 目前以氮、磷为主要去除对象的处理工艺正在取代以单一去除 COD 为目的的污水处理工艺。反硝化除磷就是利用 DPB (反硝化除磷细菌) 以硝酸盐代替氧作为电子受体将反硝化脱氮和生物除磷两个原本彼此独立的过程合二为一。显然, 在反硝化除磷脱氮的工艺中, COD 和氧量均能得到相应的节省, 但是, 在此工艺系统设计及运行中, 作为硝化作用主体的硝化菌, 一个突出的特点就是繁殖速度慢、世代时间长, 而生物除磷的主要途径是排除剩余污泥, 为了保证系统的除磷效果就不得不维持较高的污泥排放量, 系统的泥龄也不得不相应降低, 因此硝化菌和聚磷菌在泥龄上存在矛盾。

## 1 泥 龄

泥龄又称生物固体停留时间或细胞平均停留时间, 是活性污泥设计、运行和研究中一项十分重要的技术参数。表达式为

$$\theta_c = \frac{VX}{\Delta X} \quad (1)$$

式中:  $\theta_c$  为污泥龄(生物固体停留时间), d;  $V$  为反应器(曝气池)容积,  $m^3$ ;  $X$  为混合液悬浮固体(MLSS)质量浓度,  $mg/L$ ;  $\Delta X$  为每日污泥增长量(即排放量),  $kg/d$ 。

泥龄反映了微生物在曝气池中的平均停留时间, 泥龄的长短与污水处理效果有两方面的关系: 一方面是泥龄越长, 微生物在曝气池中停留时间越长, 微生物降解有机污染物的时间越长, 对有机污染物

降解越彻底, 处理效果越好; 另一方面是泥龄长短对微生物种群有选择性, 因为不同种群的微生物有不同的世代周期, 如果泥龄小于某种微生物的世代周期, 这种微生物还来不及繁殖就排出池外, 不可能在池中生存, 为了培养繁殖所需要的某种微生物, 选定的泥龄必须大于该种微生物的世代周期。

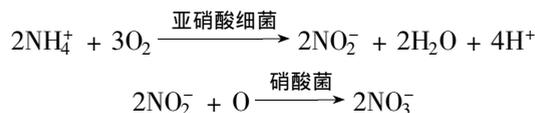
## 2 氮磷去除与泥龄的关系

### 2.1 氮的去除

污水中氮的去除分为两部分, 一种是在生物处理过程中, 污水中的一部分氮(氨氮或有机氮)被同化成微生物细胞的组成成分。泥龄通过影响污泥产生量影响污泥的含氮量。同化作用去除的氨氮与进水 BOD 的比例仅为 2% ~ 5%<sup>[1]</sup>。污水中氮的去除主要还是依靠硝化反硝化作用将废水中的氮转化为氮气从水中逸出。

#### 2.1.1 硝化反应的泥龄

氨氮氧化成硝酸盐的硝化反应是由两组自养型好氧微生物通过以下过程来完成的,



自养型硝化菌的增殖与底物去除的动力学过程可用 Monod 方程式表示,

$$\mu = \mu_{\max} \frac{S}{K_S + S} \quad (2)$$

式中:  $\mu$  为微生物的比增长速率,  $1/d$ ;  $\mu_{\max}$  为微生物

作者简介: 常飞(1979—), 男, 四川阆中人, 硕士研究生, 研究方向为污水生物处理技术。

最大比增长速度  $1/d$ ;  $K_S$  为饱和常数  $mg/L$ ;  $S$  为底物质量浓度  $mg/L$ 。

$NH_4^+ - N$  氧化为  $NO_2^- - N$  时所产生的能量, 大约为  $NO_2^- - N$  进一步氧化为  $NO_3^- - N$  所产生能量的 4~5 倍。因此要想获得相同的能量, 所氧化的  $NO_2^- - N$  也必须相当于氧化  $NO_3^- - N$  的 4~5 倍, 对于亚硝化反应和硝化反应 Monod 方程中的饱和常数  $K_N$  都小于  $1 mg/L$  (温度小于  $20^\circ C$  时)<sup>[1]</sup>, 所以硝化反应中的速度限制步骤是亚硝化菌属将  $NH_4^+ - N$  氧化成  $NO_2^- - N$  过程。因此 (2) 式可明确表示为

$$\mu_N = \mu_{N \max} \frac{N}{K_N + N} \quad (3)$$

式中:  $\mu_N$  为亚硝酸菌的比增长速率  $1/d$ ;  $\mu_{N \max}$  为亚硝酸菌的最大比增长速率  $1/d$ ;  $K_N$  为亚硝酸菌氧化氨氮的饱和常数  $mg/L$ ;  $N$  为  $NH_4^+ - N$  质量浓度  $mg/L$ 。

硝化菌的动力学参数  $\mu_N$  和  $K_N$  与异养型微生物的  $\mu$  和  $K_s$  相比, 要小一个数量级以上, 因此  $\mu_N$  值是非常小的<sup>[1]</sup>。

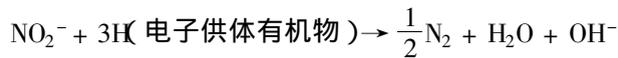
由于硝化菌的增殖速率很低, 在活性污泥系统中充分进行硝化反应必须有足够大的泥龄  $\theta_c$ 。

$$\theta_{c \min} = \frac{1}{\mu_{N \max}} \quad (4)$$

式中:  $\theta_{c \min}$  为实现硝化反应所需的最小泥龄,  $d$ ;  $\mu_{N \max}$  为硝化菌比增长速率  $1/d$ 。

### 2.1.2 反硝化反应的泥龄

反硝化反应由一群异养型微生物完成的生物化学过程。反硝化过程可由下式表示



反硝化过程中  $NO_2^-$  和  $NO_3^-$  的转化是通过反硝化细菌的同化作用(合成代谢)和异化作用(分解代谢)来完成的。同化作用是  $NO_2^-$  和  $NO_3^-$  被还原成  $NH_3 - N$  用于新微生物细胞的合成, 氮成为细胞质的成分。异化作用是  $NO_2^-$  和  $NO_3^-$  被还原成为  $NO$ 、 $N_2O$  和  $N_2$  等气态物, 主要是  $N_2$ 。异化作用去除的氮约占其总去除量的 70%~75%<sup>[1]</sup>。

对于反硝化过程, 泥龄和反硝化净比增长速率之间关系可以表示为

$$\frac{1}{\theta_c} = \mu \quad (5)$$

式中:  $\theta_c$  为泥龄  $d$ ;  $\mu$  为反硝化净比增长速率  $1/d$ 。

反硝化菌的比增长速率与一般好氧异养菌的比增长速率相近, 同样比硝化菌的比增长速率大得多。因此生物反硝化反应器所需的泥龄值也比硝化反应

小得多。

## 2.2 磷的去除

磷的最终去除其途径大体上有两种: 一种是通过排放过量吸收磷的贮磷菌污泥而去除; 另一种是微生物机体同化除磷。第二种除磷途径所占比例很小, 主要是通过第一种途径完成, 所以泥龄是除磷效率至关重要的影响因素。因此一般期望系统内维持较高的污泥量, 聚磷菌在污泥中所占的比例要高, 聚磷菌体内应有较高的含磷量, 排放的剩余污泥要多。污泥中聚磷菌所占的比例可以通过创造适宜于聚磷菌生长的条件(主要是磷负荷)来提高, 与泥龄的关系不是很大, 但其他 3 个方面的要求均与泥龄有关。

### 2.2.1 泥龄对剩余污泥产量的影响

许劲等<sup>[2]</sup>在德国目前使用的 ATV 标准上结合中国水处理工艺现状提出了剩余污泥产量公式如下:

$$\gamma = 0.6K \left( \frac{SS}{C_{BOD_{5,i}}} + 1 \right) - \frac{0.072 \times 0.6 \theta_c f_{T,H}}{1 + 0.08 \theta_c f_{T,H}} \quad (6)$$

$$SP = \gamma Q (C_{BOD_{5,i}} - C_{BOD_{5,e}}) \quad (7)$$

式中:  $\gamma$  为污泥的总产率系数;  $K$  为修正系数;  $SS$  为曝气池进水悬浮固体浓度,  $kg/m^3$ ;  $C_{BOD_{5,i}}$  为进水 BOD 浓度,  $kg/m^3$ ;  $\theta_c$  为污泥龄,  $d$ ;  $f_{T,H}$  为异养性微生物生长温度修正系数,  $f_{T,H} = 1.702^{(T-15)}$  ( $T$  为温度,  $^\circ C$ );  $Q$  为进水流量,  $m^3/d$ ;  $C_{BOD_{5,e}}$  为出水 BOD 质量浓度,  $kg/m^3$ ;  $SP$  为剩余污泥量,  $kg/d$ 。

式(6)可以变形为

$$\gamma = 0.6K \left( \frac{SS}{C_{BOD_{5,i}}} + 1 \right) - \frac{0.072 \times 0.6 f_{T,H}}{\frac{1}{\theta_c} + 0.08 f_{T,H}} \quad (8)$$

由 Lawrence-Mc Carty 方程式的推导式<sup>[3]</sup>可得

$$S_e = \frac{K_s(1 + K_d \theta_c)}{\theta_c \mu_{\max} - 1} \quad (9)$$

式中:  $S_e$  为出水水质;  $K_s$  为饱和常数;  $\mu_{\max}$  为最大比污泥净产率;  $K_d$  为污泥自身氧化率。

从式(9)可看出, 当  $\theta_c = 1/\mu_{\max} = \theta_{c \min}$  时, 污水基质未被降解,  $S_e$  等于进水水质  $S_0$  (式中可看出  $S_e \rightarrow \infty$ , 其实是不可能的), 因此存在着最小泥龄; 当  $\theta_c < \theta_{c \min}$  时, 系统不可能运行正常, 并且随着  $\theta_c$  的增加,  $S_e$  减少。随着泥龄增加, 出水 COD 质量浓度逐渐降低, 泥龄从 1~10 d 内变化时, 降低较快,  $\theta_c$  大于 10 d 后, 出水 COD 值不再有明显变化<sup>[4]</sup>。所以当式(8)中  $\theta_c$  增大时, 污泥的总产率系数  $\gamma$  将减小, 即剩余污泥量减少。

### 2.2.2 泥龄对同化除磷和生物除磷性能的影响

运用 Lawrence-Mc Carty 方程式推导出了以下的结论<sup>[5]</sup>: ①缩短泥龄可以提高系统的同化除磷能力。

②长泥龄的生物除磷系统单靠生物作用要达到完全除磷几乎是不可能的。

一般来说,泥龄短的活性污泥具有较高的活性,其体内的含磷水平也较高,这是缩短泥龄可提高除磷效率的原因之一。若系统的负荷不变,缩短泥龄(不小于聚磷菌的世代期)可增加污泥的排放量。若系统的泥龄过长,则会使污泥的活性降低,污泥的含磷量下降,使得去除单位重量的磷需消耗的 BOD 增加。此外,由于泥龄过长,污泥将趋于老化,可通过自身的氧化而使体内的磷释放在水中,同时剩余污泥量减少也导致了除磷量降低。较长的泥龄还会导致系统内糖原累积非聚磷微生物的增长而使系统的除磷效率大幅降低<sup>[6]</sup>。

### 3 单、双级污泥系统

反硝化除磷脱氮系统中,由于不同的微生物均参与到系统的循环中,好氧段中要实现硝化作用,必然维持较高的硝化菌数量,要求在较长泥龄下运行。而除磷是排泥实现,这就要求采用短泥龄来增加剩余污泥排放量。

为解决反硝化除磷脱氮工艺中出现的泥龄之争,因此反硝化除磷脱氮器有单污泥和双污泥系统之分。

在单污泥系统中,DPB 和硝化菌及非聚磷异养菌存在于同一悬浮污泥相中,共同经历了厌氧、缺氧和好氧环境;而在双污泥系统中,硝化菌则独立于 DPB 而单独存在于固定膜生物反应器或好氧硝化 SBR 反应器中。虽然在单、双污泥系统中 DPB 都可利用由硝化产生的硝酸盐作为电子受体在缺氧环境中实现反硝化除磷,但后者运行更稳定、处理效果更好,其原因是双污泥系统为硝化菌和反硝化除磷

菌创造了最佳的生长环境,且硝化和反硝化聚磷各系统的 SRT 可根据实际运行要求来选定(硝化的 SRT 较长不利于反硝化和除磷,主要原因是聚磷菌体内相当一部分 PHB 会因长时间的曝气而被消耗掉,从而导致后续反硝化所需碳源的不足<sup>[7]</sup>)。进一步说,在双污泥系统中可采用生物膜反应器进行硝化来提供  $\text{NO}_3^-$  电子受体,这样不仅给生长速率较慢的硝化菌创造了稳定的生长环境,增加了系统中硝化菌量,提高了硝化率,也可减少水力停留时间和反应器体积,同时在无需大规模污泥回流的前提下就能使出水保持较低的硝酸盐浓度<sup>[7]</sup>。目前,较典型的双污泥系统是 Dephanox 工艺和  $\text{A}_2\text{NSBR}$  工艺,单污泥系统的代表是 UCT 和 BCFS 工艺。

#### 3.1 双污泥系统 $\text{A}_2\text{NSBR}$ 工艺

$\text{A}_2\text{NSBR}$  是由  $\text{A}^2/\text{O}$ -SBR 反应器和 N-SBR 反应器组成,其工艺流程如图 1 所示。 $\text{A}^2/\text{O}$ -SBR 主要功能是去除 COD 和反硝化除磷脱氮,N-SBR 反应器主要起硝化作用。这两个反应器的活性污泥是完全分开的,只将各自沉淀后的上清液相互交换。异养型兼性菌在理想的厌氧、缺氧、好氧交替的环境下进行反硝化和除磷,同时自养型专性好氧硝化菌可始终在曝气环境中进行好氧硝化。 $\text{A}_2\text{NSBR}$  可分别控制硝化菌和异养菌(聚磷菌和反硝化菌)的泥龄,解决了异养菌和硝化菌的泥龄之争,有利于反硝化脱氮除磷和硝化的各自优化。

#### 3.2 单级污泥系统 BCFS

荷兰代尔夫特大学 Kluiver 生物技术实验室研发出一种改进型的 UCT 工艺——BCFS(Biologische-Chemische-Fosfaat-Stikstoverwijdering,生物、化学除磷工艺)工艺<sup>[8]</sup>,并在 10 座升级或新建污水处理厂中实际应用。BCFS 工艺由 5 个功能独立的反应器(厌

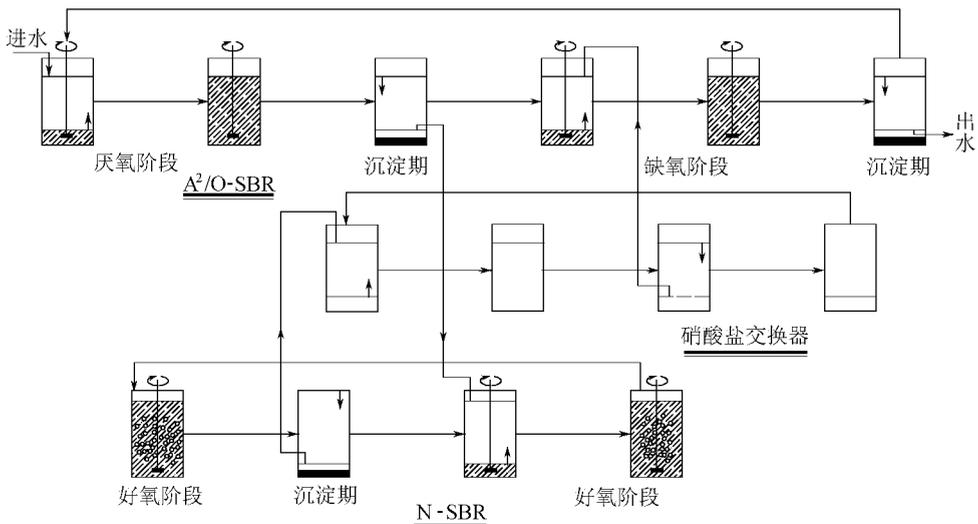


图 1  $\text{A}_2\text{NSBR}$  工艺流程

氧池、选择池、缺氧池、混合池、好氧池)及3个循环系统构成(如图2所示)。循环A是为了提供释磷条件,即硝酸盐氮小于 $0.1\text{ mg/L}$ 。因为回流污泥被直接引入到选择池,所以,从好氧池设置内循环B到缺氧池十分重要,起着辅助回流污泥向缺氧池补充硝酸盐的作用。循环C的设置是在好氧池与混合池之间建立循环,以增加硝化或同步硝化与反硝化的机会,为获得良好的出水氮浓度创造条件。3个循环的流量可通过在线监测的氧化还原电位来控制<sup>[9]</sup>。

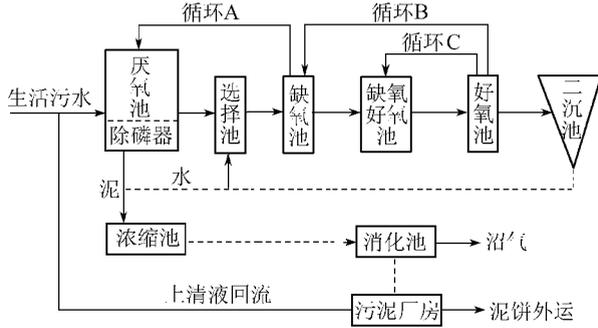


图2 BCFS工艺流程

在BCFS中,最小泥龄须先考虑硝化菌而非DPB,在常温下,虽然DPB的最小泥龄小于硝化菌的最小泥龄,但可将DPB的最小污泥龄和硝化菌的最小污泥龄视为相同。由于BCFS工艺中在厌氧池的末端设有一个除磷器进行化学除磷,降低了后续处理的磷负荷,在BCFS工艺中设计的泥龄一般为50d。

## 4 结论

a. 反硝化除磷脱氮系统中,存在着硝化菌和聚磷菌不同龄之争。泥龄越长,硝化作用越明显,泥龄对除磷有重要影响,泥龄短,除磷效果好。

b. 在单级污泥系统中,DPB、硝化菌、非聚磷异养菌存在同一污泥相中,共同经历厌氧、缺氧、好氧环境,泥龄须先考虑硝化菌,把系统的泥龄控制在一个较窄的范围,可兼顾脱氮与除磷的需要。

c. 在双级污泥系统中,硝化菌独立于DPB而单独存在,硝化和反硝化聚磷的污泥龄可根据各自实际运行要求来选定。

## 参考文献:

- [1] 郑兴灿,李亚新.污水除磷脱氮技术[M].北京:中国建筑工业出版社,1998.36~62.
- [2] 许劲,罗平,孙俊怡.城市污水生物除磷脱氮系统剩余污泥量的计算[J].重庆建筑大学学报,2003,25(5):69~74.
- [3] 周海东,刘勤亚,张业健.泥龄应用中若干问题的探讨[J].污染防治技术,2003,16(2):13~16.
- [4] 钱易.活性污泥泥龄的理论与实用意义[A].许京骥.给水排水新技术[C].北京:中国建筑出版社,1988.262~271.
- [5] 李勇,黄勇,潘杨.泥龄对生物除磷效率影响的分析[J].苏州城建环保学院学报,2001,14(1):16~21.
- [6] Fukase T,Shibata M,Miyaji Y.The role of an anaerobic stage on biological phosphorus removal[J].Wat Sci Tech,1985,(17):68~80.
- [7] Sorm R,Bortone G.Phosphate uptake anoxic conditions and fixed-film nitrification in nutrient removal activated sludge system[J].Wat Res,1996,30(7):1573~1584.
- [8] Van Loosdrecht M C M,Brandse F A,deVries A C.Upgrading wastewater treatment process for integrated nutrient removal-the BCFS process[J].Wat Sci Tech,1998,37(9):209~217.
- [9] 操家顺,杨雪冬.Van Loosdrecht M C M.BCFS——生物除磷新工艺[J].中国给水排水,2002,18(3):23~26.

(收稿日期 2004-05-28 编辑 高渭文)

## 欢迎订阅 2005 年《水处理技术》杂志(月刊)

1975年创刊的《水处理技术》杂志,是水行业最早创刊的两本期刊之一,经国家科委和国家新闻出版总署批准,由国家海洋局主管,国家海洋局杭州水处理技术研究开发中心主办。

《水处理技术》专业报道:膜和膜过程研究开发及应用;水处理系统设计和运行管理;工业纯水和超纯水制造;海水和苦咸水淡化;瓶装水优质饮用水净化;工业软化水冷却水处理;电厂给水排水;废水处理 and 再利用;液体分离浓缩和提纯;水处理药剂研制和应用;国内外行业最新动态等。杂志栏目:综述与述评;研究报告;应用技术;工程实例;技术讲座;行业动态;科学管理等。

《水处理技术》是全国中文核心期刊;中国期刊方阵双效期刊;全国科技论文统计源期刊;中国科学引文数据库来源期刊;是中国学术期刊(光盘版)、中国期刊网、万方数据资源系统、中文科技期刊数据库等的收录期刊;是美国SCI、CA、日本科技文献速报等的收录期刊。

2005年《水处理技术》由双月刊改为月刊出版,大16开,每期80页,国内外公开发行,全国各地邮局均可订阅,漏订读者可与本刊编辑部直接联系,办理补订手续。

邮发代号 32-38

每册定价 8.00元 全年定价 96.00元

地址 浙江省杭州市文华路50号

邮编 310012

电话 0571-88935417,88935347

传真 0571-88935417,88935430

E-mail: editor@chinawatertech.com

http://www.chinawatertech.com