

A²O-BAF 工艺反硝化聚磷效果的影响因素

吕冬梅,彭永臻*,赵伟华,王淑莹,曾 薇 (北京工业大学北京市污水脱氮除磷处理与过程控制工程技术研究中心,北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室,北京 100124)

摘要: 为了提高系统的反硝化除磷脱氮效率,采用静态试验考察了厌氧反应时间和厌氧段 COD 对 A²O-BAF 工艺反硝化聚磷效果的影响,同时对缺氧阶段反硝化聚磷量与脱氮量之间的关系进行了探讨.试验结果发现,在试验范围内,随着厌氧反应时间和厌氧段 COD 的增加,厌氧释磷量均增加,反硝化聚磷量,净聚磷量和硝氮去除量亦都随之增加,但是反硝化聚磷量与释磷量的比值基本维持不变.在 2 组 8 个不同的试验条件下,缺氧段反硝化聚磷量和脱氮量之间均呈现出良好的线性关系,系数为 1.007~1.053, R^2 为 0.992~0.997,反映了 A²O-BAF 系统中污泥的固有特性.

关键词: 厌氧反应时间; COD; 反硝化聚磷; 线性关系

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2015)11-3266-09

Factors influencing the denitrifying phosphorus removal efficiency of A²O-BAF process. LÜ Dong-mei, PENG Yong-zhen*, ZHAO Wei-hua, WANG Shu-ying, ZENG Wei (Engineering Research Center of Beijing, Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China). *China Environmental Science*, 2015,35(11): 3266~3274

Abstract: The effects of anaerobic reaction time and COD concentration on denitrifying phosphorus removal efficiency of A²O-BAF process were studied in parallel batch experiments, at the same time the relationship between denitrifying phosphorus uptake amount and nitrate consumption was investigated in anoxic condition. The results found that as anaerobic reaction time from 30min to 120min and COD concentration from 50mg/L to 200mg/L increased, phosphorus release amount, denitrifying phosphorus uptake amount, net phosphorus uptake amount and nitrate removal amount increased, but the ratio of denitrifying phosphorus uptake amount and release amount remained almost unchanged. In the all tests, a good linear relationship between denitrifying phosphorus uptake amount and nitrate consumption was presented in anoxic condition, with the linear coefficient and correlation coefficient ranging from 1.007 to 1.053 and 0.992 to 0.997 respectively, which showed the sludge intrinsic characteristics in the anaerobic/anoxic/aerobic process with biological aerated filter (A²O-BAF) denitrifying phosphorus removal system.

Key words: anaerobic reaction time; COD concentration; denitrifying phosphorus removal; linear relationship

传统的生物脱氮除磷工艺存在聚磷菌,硝化菌的泥龄矛盾以及反硝化菌,聚磷菌在碳源需求上的竞争,对于我国低 C/N 比城市污水来说,很难达到氮,磷的同步深度去除^[1-6].双污泥反硝化除磷工艺,耦合双污泥理论及反硝化除磷技术,创造聚磷菌和硝化菌各自最佳的生长环境,利用聚磷菌厌氧段储存体内的内碳源聚-β-羟丁酸(PHB),以硝态氮为电子受体,在缺氧环境下过量吸收水中的磷酸盐,同时反硝化,达到氮,磷污染物的同步去除,实现“一碳两用”^[7-8].它不仅解决了传统生物脱氮除磷工艺存在的矛盾和问题,而且节约

了运行费用及提高了脱氮除磷效率,与传统的脱氮除磷工艺相比,反硝化除磷不仅可以减少约 50%碳源消耗量,30%氧气消耗量,剩余污泥量也可降低约 50%^[9-11],是一种比较适合处理我国低 C/N 比城市污水的高效节能工艺,具有很大的潜在工程应用价值和发展前景.

A²O-BAF 工艺作为最新研发出来的双污泥反硝化除磷工艺,将聚磷菌和硝化细菌完全独立

收稿日期: 2015-03-27

基金项目: 国家“863”项目(2012AA063406);北京市教委资助项目

* 责任作者, 教授, pyz@bjut.edu.cn

开,聚磷菌在A²O内完成厌氧释磷,缺氧吸磷和好氧吸磷,硝化细菌在BAF中以生物膜的形态附着于活性生物填料上,完成硝化作用,给A²O中缺氧吸磷提供电子受体硝态氮,A²O通过维持较短污泥龄将硝化菌从中淘洗出去有利于促进除磷和反硝化.相比传统的双污泥反硝化除磷系统,A²O-BAF工艺具有以下优势:(1)BAF中填料处于流化状态,生物膜不易发生堵塞,且无需反冲洗;(2)A²O中污泥厌氧释磷后,直接进入缺氧区,以回流的硝态氮为电子受体进行缺氧吸磷,不存在超越污泥,氨氮去除率高;(3)A²O中好氧区不发生硝化作用从而二沉池回流污泥中不含有硝态氮,保证了厌氧区绝对的厌氧环境,有利于聚磷菌充分释磷和合成PHA;(4)系统是活性污泥和生物膜的组合工艺,管理方便,运行稳定,TN去除率高.所以,合理控制工艺参数,研究脱氮除磷的相互关系,在节能降耗的基础上,对提高系统的脱氮除磷效率,最大限度的发挥A²O-BAF工艺自身的优势具有重大现实意义.

反硝化聚磷菌通过厌氧释磷将PHB储存在体内,在缺氧段才能实现过量吸磷及反硝化,已有研究表明,在一定范围内,厌氧释磷量越

充分,反硝化聚磷效果越好^[12-13].厌氧反应时间和厌氧段COD是影响厌氧释磷量的2个关键因素,同时影响污水处理厂的基建与运行费用.本试验以A²O-BAF系统的反硝化聚磷污泥为研究对象,通过控制不同厌氧反应时间和厌氧段COD,考察厌氧段反应时间和COD的变化对厌氧释磷量及反硝化除磷脱氮效果的影响,以期A²O-BAF双污泥反硝化除磷工艺在污水处理厂处理低C/N比城市污水的推广应用提供技术参考.

1 材料与方法

1.1 反硝化聚磷污泥

试验用反硝化聚磷污泥取自实验室连续运行的A²O-BAF反硝化除磷脱氮工艺,该工艺采用活性污泥法和生物膜法相结合的双污泥运行模式(图1).系统以实际生活污水为处理对象连续运行12个月以上,稳定运行期间控制厌氧/缺氧/好氧容积比为2:6:1,硝化液回流比为300%,污泥回流比为100%,反硝化聚磷效果很稳定.A²O-BAF系统连续稳定运行期间,所进生活污水水质如表1所示.

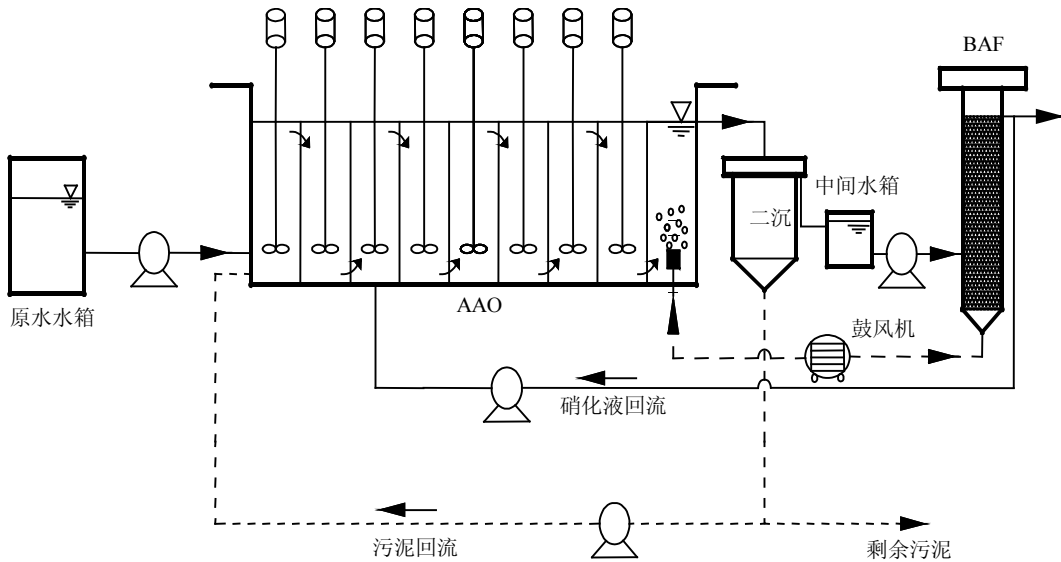


图1 A²O-BAF 工艺流程
Fig.1 Schematic diagram of A²O-BAF process

表 1 实际生活污水水质

项目	COD(mg/L)	NH ₄ ⁺ -N(mg/L)	PO ₄ ³⁻ -P(mg/L)	C/N	C/P
范围	258~326	51.6~70.5	4.5~6.3	4.5	53.8
均值	280	62.5	5.2		

1.2 试验方法

根据不同的试验研究目的,从连续流系统的二沉池中取出少量活性污泥后,曝气 20min,用超纯水反复清洗 5 遍后,平均置于多个有效容积为 1L 的小试装置中(图 2),再分别加入等体积的生活污水,分别控制不同的厌氧反应时间及厌氧段 COD(表 2,表 3)在磁力搅拌器上开始厌氧搅拌,厌氧结束后,取水样检测其中的 PO₄³⁻-P 浓度,此过程采用 WTW 在线监测仪在线监测 pH 值,恒温培养箱来维持温度适宜且稳定.

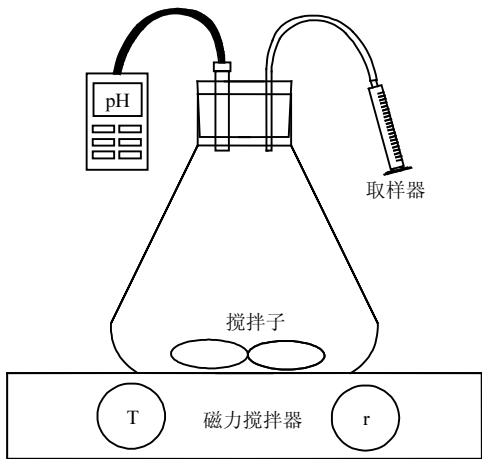


图 2 小试装置

Fig.2 Schematic diagram of experimental equipment

1.2.1 厌氧反应时间影响 通过投加乙酸钠,控制各反应器的初始厌氧段 COD 为 200mg/L 左右,控制不同的厌氧反应时间,厌氧反应结束后,撇去上清液,分别再用超纯水反复清洗 5 遍污泥,排除外碳源等对反硝化聚磷的影响.然后分别加入等体积的只含少量硝态氮的图 1 工艺流程的出水,模拟 A²O-BAF 系统的回流硝化液,同时一次性投加硝酸钾及磷酸二氢钾,进行缺氧反硝化聚磷试验.缺氧反应 3h 过程中每间隔一段时间取水样

进行检测,考察水样中 PO₄³⁻-P 和 NO₃⁻-N 的去除规律.试验期间各反应器控制参数见表 2.

表 2 厌氧反应时间试验控制参数

Table 2 The controlling parameters of anaerobic reaction time experiment

编号	温度 (°C)	pH 值	污泥浓度 (mg/L)	厌氧初始 ρ(COD) (mg/L)	厌氧反 应时间 (min)	缺氧初始 ρ(PO ₄ ³⁻ -P) (mg/L)	缺氧初始 ρ(NO ₃ ⁻ -N) (mg/L)
1#	28	7.15	4500	200	30	30.50	40.50
2#	28	7.15	4520	200	60	30.51	40.50
3#	28	7.15	4500	200	90	30.50	40.51
4#	28	7.15	4510	200	120	30.49	40.49

1.2.2 厌氧段 COD 的影响 通过投加不等量的乙酸钠,控制不同的初始厌氧段 COD,厌氧反应 2h 结束后,撇去上清液,分别再用超纯水反复清洗 5 遍污泥,排除外碳源等对反硝化聚磷的影响,然后分别加入等体积的只含少量硝态氮的图 1 工艺流程的出水,模拟 A²O-BAF 系统的回流硝化液,同时一次性投加硝酸钾及磷酸二氢钾,进行缺氧反硝化聚磷试验,缺氧反应 3h 过程中每间隔一段时间取水样进行检测,考察水样中 PO₄³⁻-P 和 NO₃⁻-N 的去除规律,并与厌氧反应时间影响试验的结果进行对比分析.试验期间具体设计参数见表 3.

表 3 厌氧段 COD 试验控制参数

Table 3 The controlling parameters of anaerobic COD concentration experiment

编号	温度 (°C)	pH 值	污泥浓度 (mg/L)	厌氧初始 ρ(COD) (mg/L)	缺氧初始 ρ(PO ₄ ³⁻ -P) (mg/L)	缺氧初始 ρ(NO ₃ ⁻ -N) (mg/L)
1#	28	7.20	4400	50	36.99	44.00
2#	28	7.20	4420	100	36.99	44.01
3#	28	7.20	4410	150	36.87	44.02
4#	28	7.20	4450	200	36.96	44.00

1.3 检测方法

NO₃⁻-N,PO₄³⁻-P 均由流动注射分析仪测定 (Lachat Quik-Chem 8000, Lachat Instrument, Milwaukee, USA); COD 按照标准方法(APHA, 2005)测定; MLSS 采用滤纸称重法测定(国家环

保局, 1997); pH 值采用 WTW inolab level2 在线监测。

2 结果与讨论

2.1 厌氧反应时间对反硝化聚磷效果的影响

由图 3a, 表 4 可知, 厌氧反应时间对缺氧段 NO₃⁻-N 的去除影响明显, 在厌氧反应时间分别为 30(1#), 60(2#), 90(3#), 120(4#)min 的条件下, 整体上随着厌氧反应时间的增加, NO₃⁻-N 的去除量增加, 分别为 9.63, 12.83, 21.06, 23.93mg/L。NO₃⁻-N 的去除率随着厌氧反应时间的增加而升高, 通过计算分别为 23.78%, 31.67%, 52.01%, 59.07%。从图 3b, 表 4 可知, 随着厌氧反应时间的增加, 反硝化聚磷量和净聚磷量(净聚磷量=聚磷量-释磷量)随之增加, 反硝化聚磷量与释磷量的比值(P 聚/P 释)却基本保持不变, 本试验中 P 聚/P 释的比值约为 1.05。厌氧释磷量增加, 分别为 9.45, 13.88, 20.70, 23.52mg/L, 厌氧结束时污泥的 PHA 含量增加, 分别为 8.2, 11.6, 17.1, 19.0mgPHA/gMLSS, 反硝化聚磷速率增加。ASM2d 模型中缺氧吸磷的动力学方程^[14]具体如下式:

$$r_{12} = \eta_{\text{NO}_3^-} \cdot q_{\text{pp}} \cdot \frac{K_{\text{O}_2}}{K_{\text{O}_2} + S_{\text{O}_2}} \cdot \frac{S_{\text{NO}_3^-}}{K_{\text{NO}_3^-} + S_{\text{NO}_3^-}} \cdot \frac{S_{\text{PO}_4^{3-}}}{K_{\text{PO}_4^{3-}} + S_{\text{PO}_4^{3-}}} \cdot \frac{X_{\text{PHA}} / X_{\text{PAO}}}{K_{\text{PHA}} + X_{\text{PHA}} / X_{\text{PAO}}} \cdot \frac{K_{\text{MAX}} - X_{\text{PP}} / X_{\text{PAO}}}{K_{\text{IPP}} + K_{\text{MAX}} - X_{\text{PP}} / X_{\text{PAO}}} \cdot X_{\text{PAO}} \quad (1)$$

式中: r_{12} 为缺氧吸磷速率; $\eta_{\text{NO}_3^-}$ 为缺氧活性降低的修正因子; q_{pp} 为 PP 贮存的速率常数; K_{O_2} 为氧的饱和/抑制系数; S_{O_2} 为反应器中含氧量; $S_{\text{NO}_3^-}$ 为反应器中硝态氮含量; $K_{\text{NO}_3^-}$ 为硝酸盐($S_{\text{NO}_3^-}$)的饱和系数; $S_{\text{PO}_4^{3-}}$ 为反应器中磷含量; $K_{\text{PO}_4^{3-}}$ 为磷($S_{\text{PO}_4^{3-}}$)的饱和系数; X_{PHA} 为污泥中 PHA 含量; X_{PAO} 为污泥中聚磷菌含量; K_{PHA} 为 PHA 的饱和系数; K_{MAX} 为 $X_{\text{PP}}/X_{\text{PAO}}$ 的最大比率; K_{IPP} 为 X_{PP} 贮存的抑制系数。

同时, 对缺氧吸磷过程作出几点合理假设: (1) 缺氧吸磷过程不受氨氮, 碱度和硝态氮的限制, 且反应器中的磷浓度远高于饱和浓度(ASM2d 中

$K_{\text{P}}=0.2\text{mg/L}$); (2) 缺氧吸磷过程不受胞内聚磷浓度限制; (3) 缺氧吸磷过程受污泥中 PHA 含量限制。实际上, 在试验过程中, 反应器内的氨氮, 硝态氮和磷浓度都比较高, 取自同一系统污泥, 胞内聚磷聚磷浓度相同, 且缺氧条件下检测到反应器中 DO 几乎为零, 这些因素并不会成为缺氧吸磷的制约因素。所以, 以上 3 点假设均能成立, 可将公式 (1) 简化为:

$$r_{12} = \eta_{\text{NO}_3^-} \cdot q_{\text{pp}} \cdot \frac{X_{\text{PHA}}}{K_{\text{PHA}}} \quad (2)$$

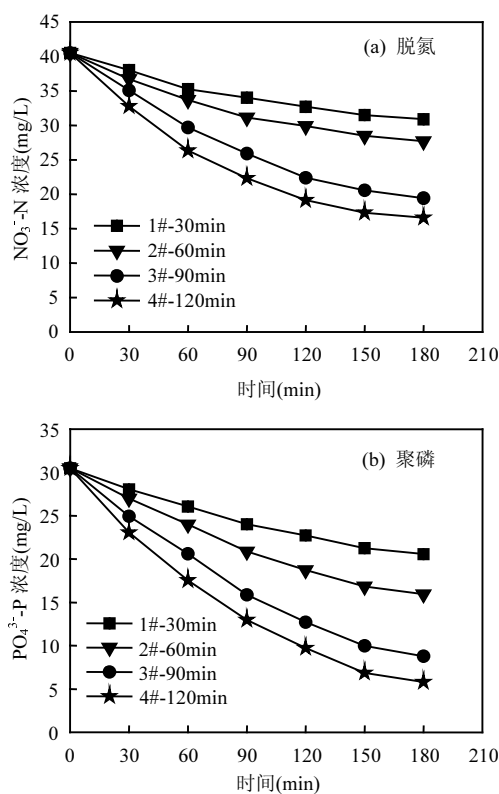


图 3 厌氧反应时间对脱氮与聚磷的影响
Fig.3 Effect of anaerobic reaction time on nitrate nitrogen removal and phosphorus uptake

根据 Wachtmeister 等^[15]和 Meinhold 等^[16]的方法估算缺氧活性降低的修正因子 $\eta_{\text{NO}_3^-}$, 认为可将 $\eta_{\text{NO}_3^-}$ 从微生物组成角度理解为具有反硝化能力的聚磷菌占有所有聚磷菌的比值, 因为试验所用污泥均取自同一时期同一系统的污泥, 可判定 $\eta_{\text{NO}_3^-}$ 基本维持不变。由厌氧结束所得出的释磷量

以及 PHA 贮存量,可得出 q_{pp}/K_{PHA} 随着厌氧反应时间的增加,呈现上升趋势,由此结合公式(2)可以得出,缺氧吸磷速率与 PHA 含量呈正相关性,即随着厌氧反应时间的增加,缺氧吸磷速率增加,与试验所得结论相符。

对比图 3a,3b 发现,缺氧段 $NO_3^{-}-N$ 的去除规律与 $PO_4^{3-}-P$ 的去除规律具有一定的相似性,经曲线拟合得出,4 种不同的厌氧反应时间下,缺氧段 $NO_3^{-}-N$ 的消耗量和 $PO_4^{3-}-P$ 的去除量之间均呈现出良好的线性关系: $y=(1.046\pm0.048)x$, $R^2>0.99$ 。图 4 为厌氧反应时间为 90min 时,缺氧段 $NO_3^{-}-N$ 的消耗量和 $PO_4^{3-}-P$ 的去除量之间的拟合曲线,并得出了关系式及相关系数,另外 3 种厌氧反应时间下的拟合曲线也都符合关系式 $y=(1.046\pm0.048)x$, $R^2>0.99$ 。

表 4 不同厌氧反应时间下厌氧释磷及反硝化聚磷脱氮效果

Table 4 The efficiency of anaerobic phosphorus release and denitrifying phosphorus and nitrate nitrogen removal under different anaerobic reaction time conditions

编号	厌氧反应时间 (min)	释磷量 (mg/L)	PHA 贮存量 (mgPHA/ gMLSS)	聚磷量 (mg/L)	净聚 磷量 (mg/L)	P 聚/ P 释	脱氮量 (mg/L)
1#	30	9.45	8.2	9.92	0.47	1.05	9.63
2#	60	13.88	11.6	14.57	0.69	1.05	12.83
3#	90	20.70	17.1	21.74	1.04	1.05	21.06
4#	120	23.52	19.0	24.70	1.18	1.05	23.93

本试验通过曲线拟合得出了不同厌氧反应时间下缺氧段 $NO_3^{-}-N$ 的消耗量和 $PO_4^{3-}-P$ 的去除量变化曲线之间的良好线性关系,相关文献^[17-19]也得到过相似的结论,但线性系数有所区别,分别为 1.021,1.2166,0.89。分析线性系数不同的原因,可能是:(1)由于对反硝化聚磷菌的驯化和富集方法有所不同,产生对氮、磷去除能力的差异;(2)试验期间,控制的温度、pH 值等外界条件不同,或是缺氧段外碳源的存在会对反硝化聚磷产生一定程度的抑制;(3)内碳源 PHB 在缺氧段被反硝化聚糖菌利用可能会消耗一部分硝态氮,导致氮去除量与磷去除量之间的差异;(4)反硝化聚磷污泥的组成与类别不同,导致厌氧段储存的内

碳源 PHB 用于缺氧段 $NO_3^{-}-N$ 和 $PO_4^{3-}-P$ 的去除量不一样。就本试验得出的线性关系,分析认为:系统长期稳定运行过程中,反硝化聚磷菌在缺氧段氧化分解体内储存的 PHB 用于自身的新陈代谢和各个生化反应,如果各个生化反应所消耗的 PHB 呈一定比例, $NO_3^{-}-N$ 的消耗量和 $PO_4^{3-}-P$ 的吸收量与 PHB 均具有一定的比例关系,那么宏观来看, $NO_3^{-}-N$ 的消耗量和 $PO_4^{3-}-P$ 的吸收量之间应表现为线性关系,这与试验所得出的结论相符。通过试验得出的线性关系式,对于 A^2O-BAF 系统,可以通过调控硝化液的回流比或是控制厌氧释磷量的多少,优化系统中硝氮与磷去除量之间的关系,对于提高系统的脱氮除磷效率以及维持系统稳定高效运行具有重要意义。

上述结论可知,厌氧释磷量随着厌氧反应时间的增加而增加,有研究发现,厌氧释磷量和微生物体内储存 PHB 量之间具有良好的线性关系^[20-21],在有效释磷的前提下,厌氧释磷量的多少一定程度上可以反映胞内 PHB 贮存量的多少^[22-26]。缺氧阶段,反硝化聚磷菌氧化分解体内储存的 PHB 用于过量吸收水中的磷酸盐,如果只考虑 PHB,那么厌氧释磷量和缺氧反硝化聚磷量通过 PHB 可以建立一定关系。由图 5 知,4 种情况下反硝化聚磷量与释磷量的比值(P 聚/P 释)变化规律基本一致,并不随厌氧反应时间的改变而变化。分析原因认为,厌氧反应时间越长,释磷量越多,那么反硝化聚磷量也越多,P 聚/P 释大体上反映了反硝化聚磷菌(DPAOS)在厌氧段释磷储存的 PHB 用于缺氧段反硝化聚磷的效率。由于 $P_{聚}/P_{释}-1=P_{净}/P_{释}$,如果 $P_{聚}/P_{释}$ 与 1 差距越小,那么单位释磷量的净聚磷量也越小,本试验中 $P_{聚}/P_{释}$ 约为 1.05,说明系统反硝化聚磷能力不高。可以采用以下方法来加大 $P_{聚}/P_{释}$ 的比值,增加系统反硝化聚磷能力:(1)延长厌氧反应时间。从试验结果发现,厌氧反应时间同时影响反硝化聚磷和脱氮效果,保证双污泥系统中足够的厌氧反应时间,使厌氧阶段充分释磷,对缺氧段氮、磷去除效果的提高有非常大的作用。但厌氧反应时间也不宜过长,避免无效释磷现象的发生,同时水力停留时间如果过长,会增加污水处理厂的基建费用;(2)适当

改变缺氧段的 HRT 和逐步增加硝化液回流比,来进一步驯化和富集反硝化聚磷菌,提高 DPAOS 本身的反硝化聚磷能力^[27-28];(3)在孙培德^[29]的全耦合活性污泥模型中,充分考虑了各类微生物种群之间的相互作用关系,将聚磷菌划分为反硝化聚磷菌和非反硝化聚磷菌,非反硝化聚磷菌在缺氧段会发生再度释磷现象,影响磷的去除率,因此,可以通过富集反硝化聚磷菌,使其成为优势菌,再根据 Mino 厌氧生化模型^[30],强化在厌氧段 PHB 的储存,增加系统反硝化聚磷能力。

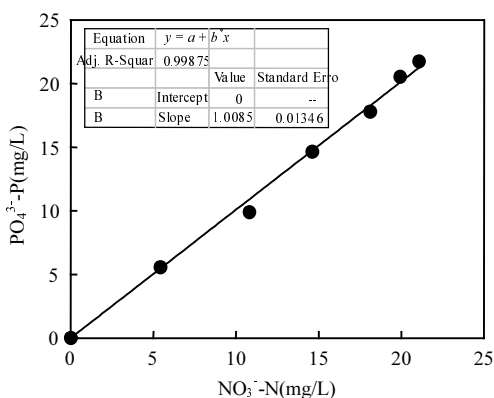


图 4 脱氮量与聚磷量的关系曲线

Fig.4 Relationship of nitrate nitrogen removal amount and phosphorus uptake amount

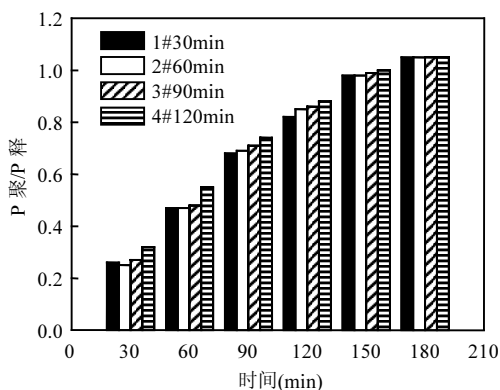


图 5 不同厌氧反应时间下聚磷量与释磷量比

Fig.5 Ratio of phosphorus uptake amount and release amount under different anaerobic reaction time conditions

2.2 厌氧段 COD 对反硝化聚磷效果的影响

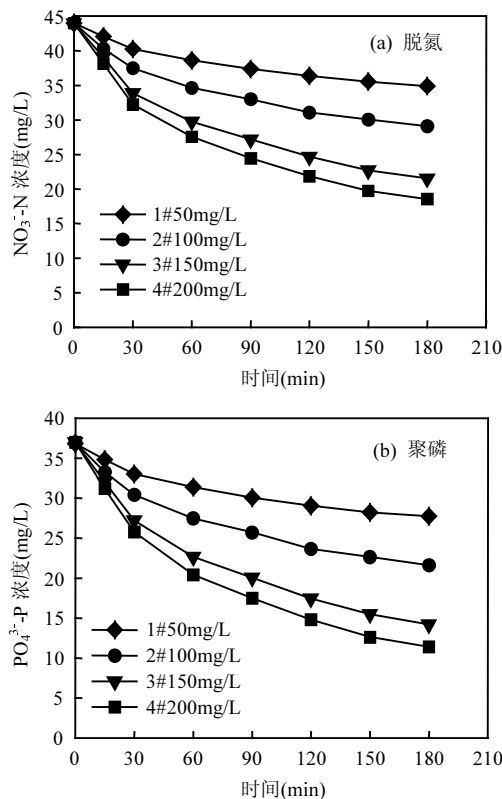


图 6 厌氧段 COD 对脱氮与聚磷的影响

Fig.6 Effect of anaerobic COD concentration on nitrate nitrogen removal and phosphorus uptake

由图 6a,表 5 知,在厌氧段 COD 分别为 50(1#),100(2#),150(3#),200(4#)mg/L 的条件下,随着厌氧段 COD 的增加, NO_3^- -N 的去除量增加,分别为 9.12,14.89,22.40,25.43mg/L。 NO_3^- -N 的去除率随着厌氧段 COD 的增加而升高,通过计算分别为 20.72%,33.84%,50.97%,57.81%。在 Monod^[31]采用纯菌所做的微生物试验中,发现微生物增长速率与底物降解之间的关系,并提出方程式,下式即为 Monod 方程式:

$$\mu = \mu_{\max} \frac{S}{K_s + S} \quad (3)$$

式中: μ 为微生物比增长速率(时间⁻¹); $\mu_{\max}$ 为微生物最大比增长速率(时间⁻¹); K_s 为饱和常数,也称半速度常数(质量/容积); S 为底物浓度(质量/容积)。从公式(3)中可以发现,微生物的增长速率与底物浓度具有密切关系,由此可以推论,在一定底

物浓度范围内,微生物的增长速率和底物浓度具有正比例关系,即反应速率和底物浓度呈现正比例关系,这与试验结论相符,在一定 COD 范围内,随着 COD 的增加,污染物去除速率增加.从图 6b,表 5 可知,随着厌氧段 COD 的增加,厌氧释磷量增加,分别为 8.67,14.65,21.71,24.37mg/L,反硝化聚磷量和净聚磷量(净聚磷量=聚磷量-释磷量)随之增加,反硝化聚磷量与释磷量的比值($P_{聚}/P_{释}$)却基本保持不变,约为 1.05.厌氧反应时间和厌氧段 COD 的改变对系统氮、磷去除规律的影响大致相同,分析认为,两者都是通过影响厌氧段磷释放量的多少,决定体内储存 PHB 的多少,从而影响缺氧段反硝化聚磷脱氮效果.两者都是影响厌氧释磷量的关键因素,且影响作用相同,合理控制厌氧反应时间和厌氧段 COD 对提高系统的脱氮除磷效率有较大的意义.在厌氧段 COD 的影响试验中,对比图 6a,6b 发现,4 种不同厌氧段 COD 条件下,缺氧段 $NO_3^- - N$ 的消耗量与 $PO_4^{3-} - P$ 的去除量之间也呈现出良好的线性关系: $y=(1.014 \pm 0.014)x, R^2 > 0.99$.

表 5 不同厌氧段 COD 下厌氧释磷及反硝化聚磷脱氮效果

Table 5 The efficiency of anaerobic phosphorus release and denitrifying phosphorus and nitrate nitrogen removal under different COD concentrations in anaerobic conditions

编号	厌氧段初始 COD(mg/L)	释磷量 (mg/L)	聚磷量 (mg/L)	净聚磷 量(mg/L)	$P_{聚}/P_{释}$	脱氮量 (mg/L)
1#	50	8.67	9.10	0.43	1.05	9.12
2#	100	14.65	15.38	0.73	1.05	14.89
3#	150	21.71	22.80	1.09	1.05	22.40
4#	200	24.37	25.59	1.22	1.05	25.43

通过控制不同厌氧反应时间和厌氧段 COD 都得出了良好的线性关系式,且线性系数变化不大,分析原因认为, (1) 2 组试验所用反硝化聚磷污泥取自同一系统,反硝化聚磷菌的驯化和富集方法相同,导致了污泥本身对氮、磷的去除能力相同;(2)试验期间,控制的温度,pH 值等外界条件基本一致,且都在厌氧结束后通过洗泥来排除外碳

源的存在对缺氧段反硝化聚磷脱氮产生抑制作用;(3)都是通过影响厌氧释磷量的多少,决定体内 PHB 的储存量,因为所用污泥相同,认为反硝化聚磷菌在缺氧段用于自身的新陈代谢和各个生化反应所消耗的 PHB 量基本相同,所以, $NO_3^- - N$ 的消耗量和 $PO_4^{3-} - P$ 的吸收量之间线性关系式的线性系数变化不大,这与试验所得出的结论相符,2 组试验得出的相似结论,更有力地说明了 A^2O-BAF 系统中污泥的特性,通过研究聚磷量与脱氮量两者之间的关系,改善污泥特性,提高系统的脱氮除磷效率.

在考察厌氧段 COD 对反硝化聚磷效果的影响试验中,通过对反硝化聚磷量与释磷量比值的分析,也发现反硝化聚磷量与释磷量比值基本不随厌氧段 COD 的变化而变化,如图 7 所示,在缺氧反应结束后, $P_{聚}/P_{释}$ 的比值也约为 1.05.分析原因如下,厌氧段 COD 越高,释磷量越多,那么储存体内的 PHB 越多,则缺氧阶段可利用的 PHB 也就越多,反硝化聚磷量与脱氮量则会随之增加.由上述试验结果可知,2 组试验的影响机制相同,且采用同一时期,同一系统的反硝化聚磷污泥,那么反硝化聚磷量与释磷量的比值理论上是基本不变的,反映了污泥本身的反硝化聚磷能力,这与试验所得结论一致.可以考虑以下方法来增加 $P_{聚}/P_{释}$ 的比值,提高系统反硝化聚磷能力:(1)增加厌氧段 COD.从试验结果发现,厌氧段 COD 同时影响反硝化聚磷和脱氮效果,保证双污泥系统中充足的厌氧段 COD,使厌氧阶段充分释磷,对缺氧段氮、磷去除效果的提高有非常重要的作用.但厌氧段 COD 也不宜过大,进入缺氧段会抑制反硝化聚磷菌的优势作用,给反硝化菌提供生长机会,同时过多加入外碳源,会增加污水处理厂的运行费用;(2)提供反硝化聚磷菌最优的生长环境,进一步驯化和富集反硝化聚磷菌,增加系统的反硝化聚磷能力^[32-34];(3)Kern-Jespersen^[35]的试验中发现,缺氧阶段反硝化聚磷菌的吸磷速率是厌氧段聚磷菌储存 PHA 的一阶方程,因此,通过控制聚磷菌的代谢过程,影响厌氧段 PHA 的生物合成途径,可以强化缺氧段反硝化除磷过程,提高系统的反硝化除磷能力.

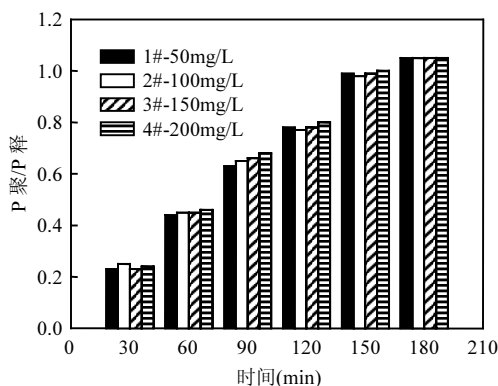


图7 不同厌氧段 COD 下聚磷量与释磷量比

Fig.7 Ratio of phosphorus uptake amount and release amount under different COD concentrations in anaerobic conditions

3 结论

3.1 厌氧反应时间和厌氧段 COD 都直接影响厌氧释磷量的多少,延长厌氧反应时间和增加厌氧段 COD,都增加了厌氧释磷量,从而反硝化聚磷量,净聚磷量及脱氮量都随之增加,两者缺氧段氮,磷的去除规律亦大致相同,说明厌氧反应时间和厌氧段 COD 对提高系统脱氮除磷效果有着同等重要的作用,且差别不大.因此,在避免无效释磷及节约基建与运行费用的基础上,延长厌氧反应时间和增加厌氧段 COD 都可作为提高系统反硝化聚磷效果的有效措施.

3.2 2 种不同的试验条件下,取自同一系统的反硝化聚磷污泥,NO₃⁻-N 消耗量与 PO₄³⁻-P 去除量之间都具有良好的线性关系,线性系数为 1.007~1.053,R² 为 0.992~0.997,反映了系统中污泥的固有特性.

3.3 在排除外碳源干扰和以 PHB 为制约因素的前提下,不论是改变厌氧反应时间还是厌氧段 COD 浓度,反硝化聚磷量与释磷量的比值都基本维持不变,体现了系统本身反硝化聚磷能力的强弱,可以采取适当措施,来提高反硝化聚磷量与释磷量的比值,增加系统的反硝化聚磷能力.

参考文献:

[1] Satoshi Tsuneda, Takashi Ohno, Koichi Soejima, et al. Simultaneous nitrogen and phosphorus removal using denitrifying

phosphate-accumulating organisms in a sequencing batch reactor [J]. Biochemical Engineering Journal, 2006,27:191-196.

- [2] Dubber D, Gray N F. The effect of anoxia and anaerobia on ciliate community in biological nutrient removal systems using Laboratory scale sequencing batch reactors (SBRs) [J]. Water Research, 2011,45(6):2213-2226.
- [3] 张 杰,臧景红,杨 宏,等.A²O 工艺的固有缺欠和对策研究 [J]. 给水排水, 2003,129(13):22-26.
- [4] Karakashev D, Schmidt J E, Angelidaki I. Innovative process scheme for removal of organic matter, phosphorus and nitrogen from pig manure [J]. Water Res., 2008,42:4083-4090.
- [5] Schmidt I, Bock E. Anaerobic ammonia oxidation with nitrogen dioxide by Nitrosomonas eutropha [J]. Arch. Microbiol., 1997, 167:106-111.
- [6] You S J, Hsu C L, Chuang S H, et al. Nitrification efficiency and nitrifying bacteria abundance in combined AS-RBC and A²O systems [J]. Water Res., 2003,37(10):2281-2290.
- [7] Wang Jian hua, Peng Yong zhen, Chen Yong zhi. Advanced Nitrogen and Phosphorus Removal in A²O-BAF System Treating Low Carbon and Nitrogen Ratio Domestic Wastewater [J]. Frontiers of Environmental Science and Engineering in china, 2011,5(3):474-480.
- [8] 张 杰,刘 婧,李相昆,等.新型双污泥反硝化除磷工艺的初步研究 [J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2008,25(1):1-5.
- [9] Kuba T, Van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Phosphorus and nitrogen removal with minimal COD requirement by integration of denitrifying dephosphatation and nitrification in a two-sludge system [J]. Wat.Res., 1996,30(7):1702-1710.
- [10] Zhou Y, Pijuan M, Yuan Z G. Development of a 2-sludge, 3-stage system for nitrogen and phosphorous removal from nutrient-rich wastewater using granular sludge and biofilms [J]. Water Res., 2008,42(12):3207-3217.
- [11] Zeng R J, Lemaire R, Yuan Z, et al. Simultaneous nitrification, denitrification, and phosphorus removal in a lab-scale sequencing batch reactor [J]. Biotechnol Bioeng, 2003,84(2):170-178.
- [12] Jens Peter, Keren-Jespersen, Mogens Henze, et al. Biological phosphorus release and uptake under alternation anaerobic and anoxic conditions in a fixed-film reactor [J]. Wat. Res., 1993, 27(4):617-624.
- [13] 王春英,隋 军,赵庆良.反硝化聚磷机理试验 [J]. 环境污染治理技术与设备, 2002,3(6):65-68.
- [14] Henze M, Gujer W, Mino T, et al. Activated sludge model no2d [J]. Wat. Sci. Tech., 1999,39(1):165-182.
- [15] Wachtmeister A, Kuba T, van Loosdrecht M C M, et al. A sludge characterization assay for aerobic and denitrifying phosphorus removing sludge [J]. Wat. Res., 1997,31(3):471-478.
- [16] Meinhold J, Filipe C D M, Daigger G T, et al. Characterization of

- the denitrifying fraction of phosphate accumulating organisms in biological phosphate removal [J]. *Wat. Sci. Tech.*, 1999,39(1):31-42.
- [17] 史 静,吕锡武.厌氧释磷量和温度对反硝化聚磷的影响 [J]. *化工学报*, 2010,61(1):166-171.
- [18] 张小玲,张立卿,袁林江,等.硝酸盐浓度对反硝化聚磷菌诱导的影响 [J]. *中国给水排水*, 2006,22(13):105-108.
- [19] 李勇智,彭永臻,张艳萍,等.硝酸盐浓度及投加方式对反硝化除磷的影响 [J]. *环境污染与防治*, 2003,25(6):323-325.
- [20] 丁彩娟,吉芳英,高小平,等.A/ASBR 中 PHB 转化与反硝化吸磷的关系研究 [J]. *重庆建筑大学学报*, 2005,27(3):80-84.
- [21] 田淑媛,王景峰,杨 睿,等.厌氧下的 PHB 和聚磷酸盐及其生化机理研究 [J]. *中国给水排水*, 2000,16(7):5-7.
- [22] Kuba T, Van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Biological dephosphatation by activated sludge under denitrifying conditions: pH influence and occurrence of denitrifying dephosphatation in a full-scale wastewater treatment plant [J]. *Wat. Sci. Tech.*, 1997, 36(12):75-82.
- [23] Smolders G J F, van der Meij J, van Loosdrecht M C M, et al. Stoichiometric model of the aerobic metabolism of the biological phosphorus removal process [J]. *Biotechnol. Bioeng.*, 1994,44(7): 837-848.
- [24] 郭劲松,黄天寅,龙腾锐.生物脱氮除磷工艺中的微生物及其相互关系 [J]. *环境污染治理技术与设备*, 2000,1(1):8-15.
- [25] Sorm R, Bortone G. Phosphate uptake under anoxic conditions and fixed-film nitrification in nutrient removal activated sludge system [J]. *Wat Res*, 1996,3(7):1573-1584.
- [26] Wachtmeister A, Kuba T. A sludge characterization assay for aerobic and denitrifying phosphorus removing sludge [J]. *Wat Res*, 1997,31(3):471-478.
- [27] 张为堂,侯 锋,刘青松,等. HRT 和曝气量对 AAO-BAF 系统反硝化除磷性能的影响 [J]. *化工学报*, 2013,65(4).
- [28] Chen Y, Peng C, Wang J, et al. Effect of nitrate recycling ratio on simultaneous biological nutrient removal in a novel anaerobic/anoxic/oxic (A2O)-biological aerated filter (BAF) system [J]. *Bioresource technology*, 2011,102(10):5722-5727.
- [29] 孙培德,王如意.全耦合活性污泥模型(FCASM3) I:建模机理及数学表征 [J]. *环境科学学报*, 2008,28(12):2404-2419.
- [30] Wentzel M C, Lotter L H, Ekama G A, et al. Evaluation of biochemical models for biological excess phosphorus removal [J]. *Water Science and Technology*, 1991,(23):567-576.
- [31] 季 民,胡振苓.活性污泥法数学模型的研究与应用 [J]. *中国给水排水*, 2001,17(8):18-22.
- [32] Zhang W, Peng Y, Ren N, et al. Improvement of nutrient removal by optimizing the volume ratio of anoxic to aerobic zone in AAO-BAF system [J]. *Chemosphere*, 2013,93(11):2859-2863.
- [33] 李亚峰,王 欣,高 颖.有机物、亚硝酸盐和 pH 值对反硝化脱氮除磷的影响 [J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2013, 29(3):531-537.
- [34] 陈永志,彭永臻,王建华,等.内循环对 A2/O-曝气生物滤池工艺脱氮除磷特性影响 [J]. *环境科学*, 2011,32(1):193-198.
- [35] Kernn-Jespersen J P, Henze M, et al. Biological phosphorus uptake under anoxic and aerobic conditions [J]. *Water Res.*, 1993, 27(4):617-624.

作者简介: 吕冬梅(1989—),女,河北省廊坊人,北京工业大学硕士研究生,主要从事污水生物处理理论与应用研究。