

反硝化聚磷过程影响因素及数学模型研究

徐 微^{1,2} 吕锡武^{2*}

(1. 安徽农业大学资源与环境学院,合肥 230036; 2. 东南大学能源与环境工程学院,南京 210096)

摘 要 反硝化聚磷过程是反硝化除磷工艺的核心过程。采用静态实验的方法研究了比污泥厌氧释磷量、污泥浓度、硝酸盐浓度几个重要参数对反硝化聚磷过程的影响,实验污泥来自实验室双泥系统。研究表明,比污泥厌氧释磷量对反硝化聚磷过程有显著影响,在电子受体充足的情况下,比污泥反硝化聚磷速率及聚磷潜能随比污泥厌氧释磷量的提高而增加,但比污泥厌氧释磷量的提高对反硝化超量聚磷量的促进作用很小;在碳源为非限制性因素下,污泥浓度对反硝化聚磷过程有显著的影响,反硝化聚磷速率随污泥浓度的增加而增加;在硝酸盐电子受体充足的情况下,硝酸盐的浓度对反硝化聚磷过程影响很小;在部分实验结果的基础上得出了一种反硝化聚磷过程的简化数学模型。

关键词 除磷脱氮 反硝化除磷 影响因素 数学模型

中图分类号 X703 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2011)10-2267-06

Study on the influencing factors and mathematical model of denitrification phosphate uptake process

Xu Wei^{1,2} Lü Xiwu²

(1. Resource and Environment College, Anhui Agriculture University, Hefei 230036, China;

2. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract The denitrification phosphate uptake process is the core reaction process of denitrification phosphorus removal technics. So the effect of several important factors including the amount of phosphorus release per MLSS(APRPM), MLSS and initial nitrate concentration on the denitrification phosphate uptake process was investigated by a series of batch tests and the experimental sludge was taken from the two-sludge system of a laboratory. The experimental results showed that APRPM had obvious effect on the phosphate uptake process and both the speed and potential of phosphate uptake increased obviously with the increasing of APRPM if the electron acceptor was adequate, but it seems to have slight effect on rising the excess of Puptake to increase APRPM. MLSS was also proved a very influential factor of the denitrification phosphate uptake when the organic carbon wasn't a limiting factor. The speed of denitrification phosphate could be accelerated by increasing MLSS. While initial nitrate concentration seemed to influence the denitrification phosphate uptake process slightly if it was adequate as electron acceptor. Based on part of the experimental results, a simplified model of denitrification was developed.

Key words denitrification and phosphorus removal; denitrifying phosphorus removal; influencing factors; mathematic model

氮、磷是造成水体富营养化的主要污染物,目前世界各国对于控制氮、磷排放量都特别重视,我国众多内陆湖泊的富营养化问题已达到了严重危害的程度,迫切需要减少水体的氮、磷排放量。城市生活污水是水体氮、磷的主要来源之一,世界各国对控制污水处理厂二级出水的氮、磷浓度普遍重视, A^2/O 等传统污水除磷脱氮工艺由于自身存在碳源竞争等固有矛盾,在处理低碳源生活污水时,很难适应日趋严格的污水排放标准,相关专家学者研究开发了许多传统除磷脱氮的改进工艺,在一定程度上提高了氮、

磷的去除效果,但仍未从根本上解决传统除磷脱氮工艺存在的矛盾。反硝化除磷脱氮机理的发现是污水除磷脱氮理论的一个重大突破,反硝化除磷脱氮工艺中聚磷菌以硝酸盐为电子受体聚磷,实现了除磷和脱氮的统一,进而解决了碳源竞争矛盾,成

基金项目:江苏省太湖水污染治理科技专项(BS2007114)

收稿日期:2010-06-09; 修订日期:2010-11-01

作者简介:徐微(1977~),女,工学博士,主要从事水处理理论与技术及水污染控制的研究。

E-mail: xuwei981@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: xiwulu@seu.edu.cn

为近年研究热点。国内外已有较多有价值的研究报道^[1-6],但相对其他除磷脱氮工艺,反硝化除磷尚属于新的领域,仍需对其机理及应用作更深入的研究。反硝化聚磷反应过程是反硝化除磷工艺的核心过程,本文研究了比污泥厌氧释磷量、污泥浓度、硝酸盐浓度几个重要参数对反硝化聚磷过程的影响,并在实验结果的基础上建立了反硝化聚磷过程的简化模型,为反硝化聚磷工艺的模拟及预测提供参考。

1 实验部分

1.1 实验污泥

本实验污泥取自东南大学实验室内的双污泥系统。该系统的设计处理规模为15 L/h,厌氧池、缺氧池设计HRT为5 h,硝化池HRT为8 h,后曝气池HRT为2 h。接种污泥来自南京城北污水处理厂污泥浓缩池,该厂采用的是UNITANK工艺。污泥经3个月的培养驯化表现出良好的反硝化除磷性能,反硝化聚磷量为总聚磷量(反硝化聚磷量与好氧聚磷量的总和)的85%以上^[7]。

1.2 实验方法

采用静态实验方法。实验污泥取自双泥系统的终沉池,经过缺氧反硝化聚磷及后曝气好氧聚磷后,污泥处于富磷状态,污泥取出后用超纯水反复清洗5~6次,曝气30 min后,分成若干份,置于多个1 L烧杯中,加入醋酸钠作为碳源,在多联磁力搅拌器上先进行厌氧释磷,以醋酸钠作为厌氧释磷碳源,实验污泥具有良好沉降性,释磷结束后,沉淀10 min,立即弃去上清液,再用超纯水对污泥反复清洗5~6次,加入磷酸二氢钾及硝酸钾,开始反硝化聚磷实验。各反应器厌氧释磷与反硝化聚磷反应的初始pH均控制在7左右,反应温度控制在27~29℃之间。各部分影响因素实验具体方法如下。

1.2.1 比污泥厌氧释磷量影响实验方法

厌氧释磷过程储存的PHB将作为反硝化聚磷过程的碳源^[8],因此厌氧释磷程度对反硝化聚磷过程有直接影响。本部分用比污泥厌氧释磷量表征厌氧释磷程度,比污泥厌氧释磷量即单位污泥厌氧释磷量,在数值上等于污泥厌氧释磷量除以污泥浓度,可以看出,该值消除了污泥浓度的影响,与厌氧释磷量相比能更直接表明污泥厌氧释磷程度。

本部分实验的目的是研究比污泥厌氧释磷量对

反硝化聚磷过程的单因素影响。使各反应器(1[#]~5[#]反应器)的污泥浓度基本接近,控制在4.10~4.20 g/L之间,其他聚磷条件亦相同,厌氧释磷前向各反应器投加的醋酸钠折算COD均为150 mg/L左右。为获得不同的比污泥厌氧释磷量,控制1[#]~5[#]反应器的厌氧释磷时间不同,依次为15、20、30、50和90 min,对应的比污泥厌氧释磷量依次为2.09、3.07、5.13、6.10和7.06。

1.2.2 碳源为非限制因素下污泥浓度影响实验方法

在碳源为限制性因素的情况下,考察污泥浓度的影响是没有意义的,当碳源为非限制性因素,即污泥达到最大比污泥厌氧释磷量时,提高污泥浓度则成为提高厌氧释磷总量,进而提高反硝化聚磷(脱氮)总量的重要途径,因此本部分实验主要研究碳源为非限制性因素情况下,污泥浓度对反硝化聚磷过程的影响。

据厌氧释磷实验(本文未报道)结果,在本部分实验所取的污泥浓度范围内,在厌氧释磷前加入折算COD为250 mg/L的醋酸钠作为碳源,可以保证碳源充足,不成为厌氧释磷的限制性因素。厌氧释磷实验(本文未报道)得到本实验污泥的释磷潜能为8.77 mg P/g MLSS,本实验中各反应器(1[#]~4[#]反应器)污泥厌氧释磷3 h后的比污泥释磷量为8.75~8.81 mg P/g MLSS,说明各反应器污泥均已充分释磷,比污泥厌氧释磷量不成为影响因素,使1[#]~4[#]反应器MLSS不同,分别为1.11、2.10、3.09和4.39 g/L,考察污泥浓度对反硝化聚磷过程的单因素影响。

1.2.3 硝酸盐浓度影响实验方法

硝酸盐是反硝化除磷过程的一个重要中间产物,一方面原水中的各种形态的氮一般要先转变成硝态氮再在反硝化作用下去除,另一方面硝酸盐为缺氧过程的主要电子受体。本部分实验主要考察硝酸盐浓度对反硝化聚磷过程的影响规律。使各反应器污泥厌氧释磷条件相同,进而比污泥厌氧释磷量相互接近,在8.49~8.51 mg P/g MLSS之间;污泥浓度亦基本相同,各反应器污泥浓度在3.54~3.57 g/L之间。在反硝化聚磷(缺氧聚磷)开始前投加不同浓度硝酸盐。

以上各影响因素实验中,聚磷反应开始前投加的磷酸盐及硝酸盐浓度如表1所示,序号I、II、III分别代表比污泥厌氧释磷量影响实验、污泥浓度影响实验、硝酸盐浓度影响实验。

表 1 各实验聚磷反应初始 SP 与 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度Table 1 Initial concentrations of SP and $\text{NO}_3^- \text{-N}$ of each test

(mg/L)

实验序号	项 目	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]
I	聚磷反应初始 SP	34.33	34.08	34.8	34.6	35.16	
	聚磷反应初始 $\text{NO}_3^- \text{-N}$	50.12	51.44	51.9	49.69	50.01	
II	聚磷反应初始 SP	45.57	45.55	45.27	45.85		
	聚磷反应初始 $\text{NO}_3^- \text{-N}$	49.57	50.52	50.69	50.49		
III	聚磷反应初始 SP	30.06	34.04	33.69	35.97	37.37	40.37
	聚磷反应初始 $\text{NO}_3^- \text{-N}$	21.27	30.51	40.84	50.32	60.78	69.27

反硝化聚磷动力学表达式^[9]及前期实验结果都表明,较高的初始磷酸盐浓度对聚磷过程不产生影响,因此在硝酸盐浓度影响实验的聚磷反应前向各反应器投加不同浓度磷酸盐,目的使各反应器污泥聚磷曲线能够相互错开,从而更清晰地反映实验结果。

2 实验结果与讨论

2.1 比污泥厌氧释磷量的影响

图 1(a)、图 1(b) 分别为不同比污泥厌氧释磷量下的反硝化聚磷曲线及对应的脱氮曲线,可以看出,比污泥厌氧释磷量对反硝化聚磷过程有显著影响。各反应器剩余硝酸盐浓度均在 20 mg/L 以上,剩余磷酸盐浓度在 5 mg/L 以上,说明硝酸盐、磷酸盐不成为反硝化聚磷的限制因素,各条件下的反硝化聚磷潜能都已得到充分发挥。

聚磷菌通过在厌氧条件下释磷,在好氧或缺氧条件下超量聚磷作用(聚磷量超过释磷量)来实现对磷的去除。在双污泥等反硝化除磷工艺中,同时包括反硝化聚磷(缺氧池)与好氧聚磷(后曝气池)^[10]。图 1(a)表明,在电子受体充足的情况下,随着比污泥厌氧释磷量的提高,比污泥反硝化聚磷量显著增加。但实验数据表明,比污泥反硝化超量聚磷量(比污泥反硝化聚磷量与比污泥厌氧释磷量的差值)提升不明显,且处于较低水平,其值在 0.25~0.88 mg P/(L·g MLSS) 之间,由此可以得出反硝化超量聚磷作用对磷的去除能力有限,因此无论电子受体充足与否,对双泥系统来说,后曝气池对保证较低的出水磷酸盐浓度都起着必不可少的作用。

在反硝化聚磷过程中, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 转变为 N_2 的电子供体为 DPB 体内储存的 PHB,比污泥厌氧释磷量越大,单位 DPB 污泥体内储存的 PHB 越多,其反硝化聚磷速率越高,对应脱氮潜能越大(如图 1(b) 所示)。综上可得,比污泥厌氧释磷量提高的主要意义在于脱氮效率的提高。

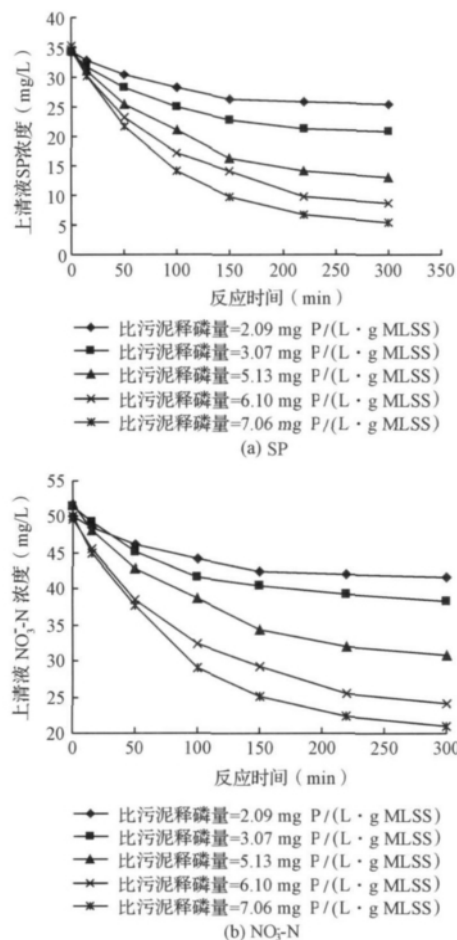


图 1 比污泥厌氧释磷量对反硝化聚磷过程的影响

Fig. 1 Effect of the mass of phosphorus released by per MLSS on denitrifying phosphorus uptake

由图 1(a) 可以看出,若比污泥厌氧释磷量一定,聚磷速率随反应时间的增加而降低;同一反应历时下,聚磷速率则随比污泥厌氧释磷量的增加而增加,由此可以得出其他反应条件一定的情况下,反硝化聚磷速率为反应时间和比污泥厌氧释磷量的二元函数。反硝化聚磷速率与污泥浓度的比值等于单位污泥在单位时间的聚磷量,反映了污泥的聚磷能力,在本研究中称为比污泥反硝化聚磷速率。本实验各反应器

的污泥浓度基本相同,因此可得比污泥反硝化聚磷速率亦为反应时间和比污泥厌氧释磷量的二元函数。

2.2 碳源为非限制因素下污泥浓度的影响

图2(a)、图2(b)分别为不同污泥浓度下的聚磷和脱氮曲线。可以看出在碳源为非限制性因素下,污泥浓度对反硝化聚磷过程有着显著影响,污泥浓度越高反硝化聚磷速率越高,反硝化聚磷总量越大。

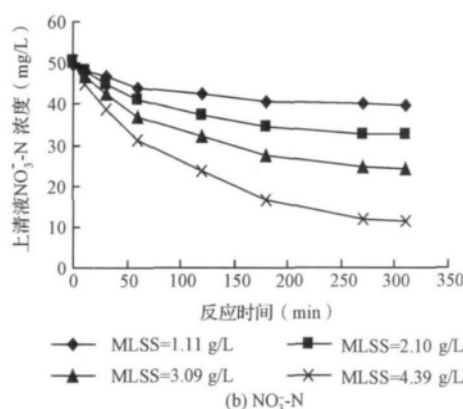
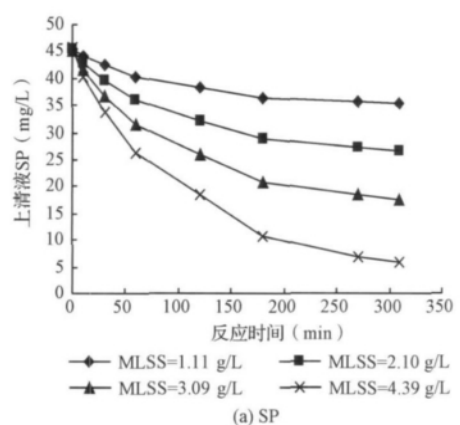


图2 MLSS 对反硝化聚磷过程的影响

Fig.2 Effect of MLSS on denitrifying phosphorus uptake

图2(b)中各反应器投加的C/N比相同,脱氮效果的差别表明在原水碳源相对充足的情况下,还必须保证有足够的污泥浓度才能实现碳源的有效利用,但污泥浓度的提高应考虑比污泥厌氧释磷量,其原则是保证碳源被充分利用,且比污泥厌氧释磷量最大,否则将降低污泥反硝化聚磷效率。

2.3 硝酸盐浓度的影响

硝酸盐浓度影响实验结果如图3(a)、图3(b)所示。可以看出各反应器的聚磷曲线在开始一段相互平行,1[#]反应器(初始 $[\text{NO}_3^--\text{N}] = 21.27 \text{ mg/L}$)与2[#]反应器(初始 $[\text{NO}_3^--\text{N}] = 30.51 \text{ mg/L}$)在反应后期的聚磷速率开始小于其它反应器,1[#]反应器尤为

明显。3[#]反应器(初始 $[\text{NO}_3^--\text{N}] = 40.84 \text{ mg/L}$)、4[#]反应器(初始 $[\text{NO}_3^--\text{N}] = 50.32 \text{ mg/L}$)、5[#]反应器(初始 $[\text{NO}_3^--\text{N}] = 60.78 \text{ mg/L}$)、6[#]反应器(初始 $[\text{NO}_3^--\text{N}] = 69.27 \text{ mg/L}$)整个聚磷过程的聚磷曲线与脱氮曲线都几乎是平行的,说明在硝酸盐电子受体充足的情况下,硝酸盐浓度对反硝化聚磷过程影响很小,这与文献[3]得出的结论是一致的。以上结果可用ASM2D模型做出解释,在反硝化聚磷速率的表达式中包含了硝酸盐浓度的开关函数项:

$$\frac{S_{\text{NO}_3^-}}{K_{\text{NO}_3^-} + S_{\text{NO}_3^-}}$$
 ($S_{\text{NO}_3^-}$ 为硝酸盐浓度, $K_{\text{NO}_3^-}$ 为硝酸盐的饱和系数)。 $K_{\text{NO}_3^-}$ 对完整描述反硝化动力学相当重要,因此对它的研究也很多,对于普通反硝化过程其典型值^[9]在 $0.1 \sim 0.2 \text{ mg NO}_3^--\text{N/L}$ 。文献[9]指出:因为 $K_{\text{NO}_3^-}$ 很小,所以在电子受体充足的情况下,普通反硝化过程表现为硝酸盐质量浓度的零级反应。反硝化聚磷为一种特殊的反硝化过程(伴随聚磷),但相对于普通反硝化过程来说,仅是改变了电子供体的形式,由外碳源变为体内存储的PHB,因此可

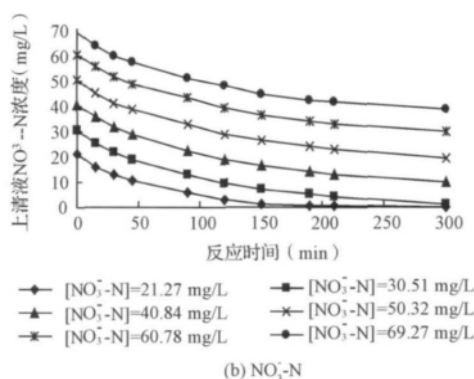
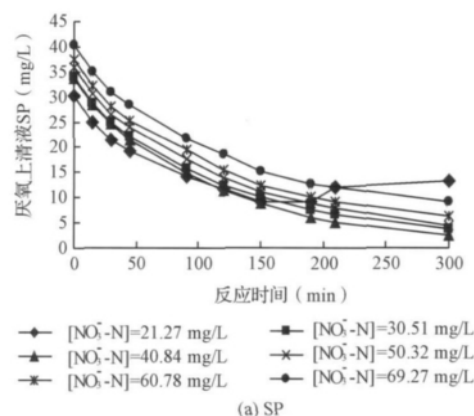


图3 硝酸盐浓度对反硝化聚磷的影响

Fig.3 Effect of concentration of NO_3^--N on denitrifying phosphorus uptake

以推出,在电子受体充足的情况下,反硝化聚磷反应亦接近硝酸盐浓度的零级反应,表现为硝酸盐浓度对反硝化聚磷过程无显著影响。

由图 3(a) 还可以看到,1[#]反应器的聚磷曲线出现了一段“上翘”,在数据上表现为上清液磷酸盐浓度在下降到一定值后,开始回升,磷酸盐浓度开始回升正是硝酸盐浓度接近零点的时刻,说明磷酸盐浓度的回升主要是因为硝酸盐几乎耗尽,使得反应器内的氧化还原电位降低,出现了“二次释磷”现象。“二次释磷”属于无效释磷,应予以避免,因此对于电子受体不足的反应系统,应适当减少缺氧池的停留时间以防止“二次释磷”的出现。

3 反硝化聚磷过程数学模型

反硝化聚磷过程数学模型是反硝化除磷工艺模拟及控制的基础。ASM2D 模型将反硝化聚磷过程描述为 X_{pp} 缺氧储存过程。

ASM2D 模型中缺氧(反硝化)聚磷速率表达式较为复杂,实际应用中需作出必要简化,Ulf Jeppsson^[11]采用线性表达方式建立具有除磷脱氮功能的污水处理系统简化模型,并指出该形式基于自动控制或者工程需要是可以满足精度要求的。目前,缺氧反硝化聚磷速率 ρ 表达式一般被简化成如下形式:

$$\rho = k_{pp} C_{MLSS} S_{PO_4} \quad (1)$$

表 2 比污泥反硝化聚磷速率与反应时间、比污泥释磷量关系

Table 2 Relation of the denitrifying phosphorus uptake speed per MLSS and reaction time & the mass of phosphorus released by per MLSS

反应时间(h)	平均比污泥反硝化聚磷速率(mg P/(L · h · g MLSS))					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
0. 17						7. 47
0. 25	1. 53	2. 18	3. 64	4. 24	4. 92	
0. 5						5. 51
0. 83	1. 16	1. 66	2. 73	3. 31	3. 94	
1						4. 65
1. 67	0. 89	1. 31	2. 01	2. 54	3. 08	
2						3. 19
2. 5	0. 77	1. 07	1. 79	1. 99	2. 48	
3						2. 69
3. 67	0. 56	0. 82	1. 37	1. 64	1. 9	
4. 5						1. 94
5	0. 43	0. 63	1. 06	1. 23	1. 45	
5. 17						1. 76

注:第(1)~(6)列对应的比污泥释磷量(mg P/(L · g MLSS))依次为:2. 09、3. 07、5. 13、6. 10、7. 06、8. 76。

表 2 中第(1)~(5)列由 1. 2. 1 实验数据计算得到,污泥聚磷前均未达到最大释磷量;第(6)列则由 1. 2. 2 实验数据计得到,各反应器污泥在厌氧段

式中: C_{MLSS} 为污泥浓度; k_{pp} 为缺氧聚磷常数。

因在电子受体充足情况下,反硝化聚磷反应接近硝酸盐浓度的零级反应,故模型中不含硝酸盐浓度开关函数项。AMS2D 模型中磷酸盐浓度开关函数项中的 K_{ps} 很小,文献[11]中给出该值为 0. 2 mg/L,因此反硝化聚磷过程实际上接近于磷酸盐浓度的零级反应。但采用式(1)的简化方式仍有一定的合理性,因 DPB 体内储存的 PHB 为反硝化聚磷速率的主要控制因素,而磷浓度的变化与 PHB 消耗具有一定相关性。式(1)的不足之处在于不能体现厌氧释磷对反硝化聚磷速率的影响。

针对式(1)的不足,本文采用平均比污泥反硝化聚磷速率(对反应时间平均)来反映反硝化聚磷的动力学特性,并将反硝化聚磷速率表达成如下线性形式:

$$\rho = K_{p-upt} C_{MLSS-q} \quad (2)$$

式中: C_{MLSS-q} 为缺氧池污泥浓度; K_{p-upt} 为比污泥缺氧聚磷速率。

前文得出,在其他条件一定的情况下, K_{p-upt} 为反应时间和比污泥厌氧释磷量的二元函数,可反映厌氧释磷过程的影响,但较难求出其解析表达式。由 1. 2. 1、1. 2. 2 实验数据得出了不同反应时间不同比污泥厌氧释磷量下的平均比污泥反硝化聚磷速率表,如表 2 所示。

均充分释磷,平均比污泥厌氧释磷量为 8. 76 mg P/(L · g MLSS),各反应器污泥在同一反应历时内的平均比污泥反硝化聚磷速率相互接近,在每个历时

取各反应器污泥在该历时内平均比污泥反硝化聚磷速率的平均值,得到表2最后一列数值。在已知缺氧池反应时间并计算出比污泥厌氧释磷量后,可查表2得到 K_{p-upt} ,如反应时间和比污泥厌氧释磷量不在表中,则可采用内插法计算该值。

4 结 论

本文主要研究了DPB污泥反硝化聚磷过程的影响因素,从计量学及动力学的角度对实验结果进行了分析,并根据实验结果建立了反硝化聚磷过程的简化模型,主要得出以下研究结论:

(1) 厌氧释磷量对反硝化聚磷过程有显著影响,在电子受体充足的情况下,随着比污泥厌氧释磷量的提高,比污泥反硝化聚磷速率及聚磷能力显著增加,但比污泥厌氧释磷量的提高对反硝化超量聚磷量的促进作用较小,比污泥厌氧释磷量提高的主要意义在于脱氮效果的提高,对双污泥反硝化除磷工艺来说,后曝气池的设置对保证较低的出水磷浓度起着必不可少的作用。

(2) 在碳源为非限制性因素下,污泥浓度对反硝化聚磷过程有着显著的影响,反硝化聚磷速率随污泥浓度的增加而增加;对于反硝化除磷工艺来说,要取得较好的脱氮效果,除具有合理的C/N比外还必须保证足够的泥浓度使碳源可被充分吸收转化为PHB,作为反硝化聚磷过程的电子供体。

(3) 硝酸盐电子受体充足的情况下,硝酸盐浓度对反硝化聚磷过程影响很小,当硝酸盐电子受体不足时,则会影响反硝化聚磷效果,对于硝酸盐电子受体不足的反应系统,应适当减少缺氧池的停留时间以防止“二次释磷”的出现。

(4) 在其它条件一定的情况下,DPB污泥的平均比污泥反硝化聚磷速率为反应时间和比污泥厌氧释磷量的二元函数。反硝化聚磷过程可用下式描述: $\rho = K_{p-upt} C_{MLSS-q}$ (各符号意义同前文)。

参 考 文 献

- [1] 王亚宜,王淑莹,彭永臻,等. MLSS、pH及 NO_2^- -N对反硝化除磷的影响. 中国给水排水, 2005, 21(7): 47-51
Wang Yayi, Wang Shuying, Peng Yongzhen, et al. Influence of MLSS, pH, and NO_2^- -N concentration on denitrifying phosphorus removal. China Water & Wastewater, 2005, 21(7): 47-51 (in Chinese)
- [2] 曹长青,雷中方,胡志荣,等. 反硝化除磷过程中的影响因素探讨. 中国给水排水, 2005, 21(7): 22-25
Cao Changqing, Lei Zhongfang, Hu Zhirong, et al. Discussion on the affecting factors of denitrifying phosphorus removal. China Water & Wastewater, 2005, 21(7): 22-25 (in Chinese)
- [3] 李相昆、张杰、黄新荣. 反硝化聚磷菌的脱氮除磷特性研究. 中国给水排水, 2006, 22(3): 35-38
Li Xiangkun, Zhang Jie, Huang Rongxin, et al. Study on characteristic of denitrification phosphorus removal bacteria. China Water & Wastewater, 2006, 22(3): 35-38 (in Chinese)
- [4] Merzouki M., Bernet N., Delgenes J. P., et al. Effect of prefermentation on denitrifying phosphorus removal in slaughterhouse wastewater. Bioresour. Technol., 2005, 96(12): 1317-1322
- [5] Zhang Hanmin, Wang Xiaolin, Xiao Jingni, et al. Enhanced biological nutrient removal using MUCT-MBR system. Bioresource Technology, 2009, 100(3): 1048-1054
- [6] 王振,袁林江,刘爽. A/A系统反硝化除磷的强化及其稳定性研究. 环境科学, 2009, 30(10): 2975-2980
Wang Zhen, Yuan Linjiang, Liu Shuang. Improvement of denitrifying dephosphatation in an anaerobic/anoxic sequencing batch reactor and its stability. Environmental Science, 2009, 30(10): 2975-2980 (in Chinese)
- [7] 徐微,吕锡武,蒋彬. 反硝化聚磷污泥培养驯化及关键参数研究. 中国给水排水, 2009, 25(5): 5-8
Xu Wei, Lu xiwu, Jiang Bin. Enrichment and domestication of denitrifying phosphorus removal sludge and the key parameter research. China Water & Wastewater, 2009, 25(5): 5-8 (in Chinese)
- [8] Baker P. S., Dold P. I. Denitrification behavior in biological excess phosphorus removal activated sludge system. Water. Res., 1996, 30(4): 769-780
- [9] 国际水协废水生物处理设计与运行参数数学模型课题组著,张亚雷,李咏梅,译. 活性污泥数学模型. 上海: 同济大学出版社, 2002
IWA, translated by Zhang Yalei, Li Yongmei. Activatd Sludge Mathematical Model. Shanghai: Tongji University Press, 2002 (in Chinese)
- [10] 王亚宜,彭永臻,殷芳芳,等. 双污泥SBR工艺反硝化除磷脱氮特性及影响因素. 环境科学, 2008, 29(6): 1526-1532
Wang Yayi, Peng Yongzhen, Yin Fangfang, et al. Characteristics and affecting factors of denitrifying phosphorus removal in two-sludge sequencing batch reactor. Environmental Science, 2008, 29(6): 1526-1532 (in Chinese)
- [11] Ulf Jeppsson. Modelling aspects of wastewater treatment processes. Doctoral Dissertation. Lund, Sweden: Industrial Automation Department of Industrial Electrical Engineering and Automation of Lund University, 1996