

平均粒径对好氧颗粒污泥脱氨效果的影响

陈芳媛, 宁平

(昆明理工大学 环境科学与工程学院, 昆明 650500)

摘要:将 R_1 和 R_2 间歇序批式反应器(SBR)中平均粒径大小分别为 $1\ 300\ \mu\text{m}$ 和 $900\ \mu\text{m}$ 的脱碳好氧颗粒污泥接种硝化活性污泥,以提高系统氨氮脱除率。试验结果表明, R_2 中的小平均粒径好氧颗粒污泥,经2周后氨氮脱除率达到90%以上;而 R_1 中的大平均粒径好氧颗粒污泥,经3周半后氨氮脱除率才达到相同水平。平均粒径小的好氧颗粒污泥比表面积大,接种活性污泥附着量大,渗透接种至颗粒污泥中快,因而系统氨氮脱除速率增加迅速。系统周期分析表明,虽然 R_1 中大粒径好氧颗粒污泥 $0.033\ \text{d}^{-1}$ 的硝化速率小于 R_2 中小颗粒污泥 $0.060\ \text{d}^{-1}$ 的硝化速率,其 $10\ \text{g/l}$ 的污泥浓度大于小粒径颗粒污泥 $6\ \text{g/l}$ 的污泥浓度,从而导致两个系统的氨氮脱除时间相同,即 $2.5\ \text{h}$ 。由于 R_1 中大粒径好氧颗粒污泥内部缺氧区相对小粒径好氧颗粒污泥大,其脱氨效率(64.7%)相对小颗粒污泥脱氨效率(57.3%)高一些。

关键词:好氧颗粒污泥;平均粒径;氨氮脱除;废水处理

中图分类号:X703.1

文献标志码:A

文章编号:1674-4764(2012)S1-0215-04

Influence of Mean Size on Ammonia Removal of the Aerobic Granules

CHEN Fangyuan, NING Ping

(College of Environmental Science & Technology, Kunming University of Science & Technology, Kunming, 650500, P. R. China)

Abstract: Aerobic granules with mean sizes of $1300\ \mu\text{m}$ and $900\ \mu\text{m}$ were seeded with nitrifying activated sludge in sequencing batch reactors (SBR) in this study. The results show that ammonia removal efficiency of the small-size granules increased to 90% within 2 weeks, while big-size granules got to the same level in 3 weeks. It is speculated that small-size granules had greater increasing nitrification rate for their bigger surface area and greater absorption ability when seeded with nitrifying activated sludge, which caused fast seeding of nitrifying bacteria in R_2 . Through cycle analysis, it shows that it took about $2.5\ \text{h}$ for the both reactors to remove ammonia in the system, though the nitrification rate in R_1 ($0.033\ \text{d}^{-1}$) is lower than that of R_2 ($0.060\ \text{d}^{-1}$). The higher biomass concentration in R_1 ($10\ \text{g/l}$) than that in R_2 ($6\ \text{g/l}$) explains. At the same, it was found that total inorganic nitrogen (TIN) removal efficiency in R_1 was higher than that in R_2 , i. e. 64.7% vs. 57.3% , which was resulted from the bigger anoxic zone in R_1 .

Key words: aerobic granules; mean size; ammonia removal; wastewater treatment

近十几年来,应用于废水处理中的好氧颗粒污泥受到许多研究者的关注。相对传统的活性污泥而言,好氧颗粒污泥具有规则的形状,结构密实,沉降性能优良,能维持高生物量,对温度、冲击负荷、毒物具有很强的抵抗力,因此能大大提高系统负荷能力,减少占地,保证系统高效稳定运行^[1-4]。

好氧颗粒污泥粒径范围分布很广,颗粒平均粒径从 $100\sim 9\ 000\ \mu\text{m}$ 都有报道^[4-7]。不同粒径大小的好氧颗粒污泥具有不同的形态和物理特征。Liu 等研究表明,平均粒径较大的好氧颗粒污泥内部具有更大的传质阻力,不利于基质的降解。当好氧颗粒污泥平均粒径大于 $700\ \mu\text{m}$ 时,其内部传质阻力开始影响反应速率^[8]。因此,小颗粒好氧颗粒污泥相对大颗粒污泥具有更高的传质和基质转化速率。一般来讲,好氧颗粒污泥粒径大小对于利用异养菌进行有机质降解过程影响不大,但是其对利用自养菌进行无机质降解过程的影响较大。就废水中的氨氮而言,好氧颗粒污泥粒径大小对其脱

除速率有较大影响^[9]。另一方面,由于好氧颗粒污泥具有颗粒形态和密实的结构,平均粒径较大的颗粒污泥内部存在缺氧(或厌氧)区域^[10-11]。研究表明,大颗粒单个好氧颗粒污泥能够实现颗粒外层硝化和内层反硝化(同步硝化反硝化),进行废水脱氮^[12-14]。而好氧颗粒粒径大小,由于影响颗粒中好氧区域和缺氧区域大小进而影响硝化和反硝化速率^[13-14],直接影响系统脱氮效率。因此,好氧颗粒粒径大小对废水中氨和总氮的脱除有很大影响。然而,在实际操作过程中,好氧颗粒污泥粒径大小由于受到诸多因素影响而难以控制。

目前,针对不同粒径好氧颗粒污泥对污染物降解过程影响的研究较少。本研究拟在2个间歇式续批反应器(SBR)中接种不同粒径大小的好氧颗粒污泥,考察其颗粒接种硝化活性污泥后氨氮脱除效果差别,并通过其废水处理周期分析考察其脱氮效果,为不同粒径大小好氧颗粒污泥脱氮及脱氮研究奠定基础。

1 试验条件与方法

1.1 反应器设计

试验在两根相同的柱状间歇式续批反应器(SBR)R₁和R₂内进行。反应器内径为5 cm,高径比为20。反应器上部进水,中部出水,容积交换率50%。其中,R₁反应器接种颗粒污泥为平均粒径1 300 μm的好氧颗粒污泥,而R₂反应器接种颗粒为平均粒径900 μm的好氧颗粒污泥。反应周期设定为6 h:进水10 min,厌氧50 min,好氧265~293 min,沉淀2~30 min,排水5 min,由时间控制器自动控制。通过吸水泵将反应器上部进水不断循环至反应器底部来实现缺氧段的泥水混合。而好氧段的过程则通过空压机充氧与设置在反应器底部的曝气石分散器来实现,曝气流量为3 L/min。试验过程在温室(22±5)℃内完成。

1.2 试验水质

试验进水为合成废水,COD由醋酸钠配制而成,配制浓度1 000 mg/L。其他成分为NH₄⁺-N 100 mg/L, K₂HPO₄ 22.5 mg/L, CaCl₂ 15 mg/L, MgSO₄·7H₂O 12.5 mg/L, FeSO₄·7H₂O 10 mg/L,以及微量元素 MnCl₂·4H₂O 0.12 mg/L, ZnSO₄·7H₂O 0.12 mg/L, CuSO₄·5H₂O 0.03 mg/L, (NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O 0.05 mg/L, NiCl₂·6H₂O 0.1 mg/L, CoCl₂·6H₂O 0.1 mg/L, AlCl₃·6H₂O 0.05 mg/L, H₃BO₃ 0.05 mg/L。

1.3 试验分析方法

COD、氨氮、SVI、MLSS和MLVSS按照标准测定方法(APHA,1998)测定。硝酸根和亚硝酸根有离子分析光谱(IC, Dionex, USA)测定。颗粒形态通过电子显微镜(Olympus SZX9)观察。当颗粒污泥粒径小于2 mm时,平均粒径由激光粒子尺寸分析仪(Malvern MasterSizer Series 2600, Malvern instruments Ltd, Malvern, UK)测定;当其粒径大于2 mm时,平均粒径由图形分析系统(Image-Pro Plus, V4.0, Media Cybernetics)和电子显微镜(Olympus SZX9)测定。

2 试验结果及讨论

2.1 不同粒径好氧颗粒污泥物理特征

试验使用好氧颗粒污泥为试验室培养的平均粒径分别为1 300 μm和700 μm的好氧颗粒污泥。污泥沉淀性能良好,SVI₃₀维持在50 mL/g左右。图1和图2显示了好氧颗粒污泥的形态:颗粒呈球形或椭球形,表面不平整,颗粒颜色为黄色。

2.2 不同粒径好氧颗粒污泥废水处理效果

图3和图4显示R₁和R₂反应器中好氧颗粒污泥处理碳氮合成废水过程中对COD和氨氮的脱除效果。两种不同粒径大小的颗粒污泥对COD脱除效果差别不大,脱除率从接种以后一直维持在90%以上。可见,颗粒平均粒径大小对颗粒污泥系统的COD脱除影响不大。从氨氮脱除效果看,2个反应器中氨氮脱除率都只有50%左右,而且增长缓慢。由于系统COD进水浓度高,异养菌增长速率快,异养菌在好氧颗粒污泥菌落中始终占竞争优势;而作为弱势菌种的自养型硝化菌,生长速率很慢,很难短时间内在颗粒中大量聚集^[15-16]。因此系统氨氮脱除率不能很快达到较高水平。

从不同颗粒粒径大小的好氧颗粒污泥相同的氨氮脱除率来看,颗粒粒径大小对试验中的好氧颗粒污泥的氨氮脱除没有太大影响。

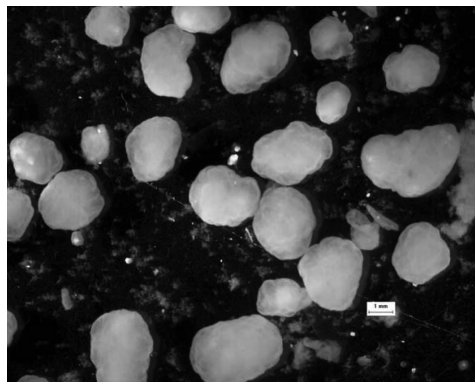


图1 R₁反应器中成熟好氧颗粒污泥形态图

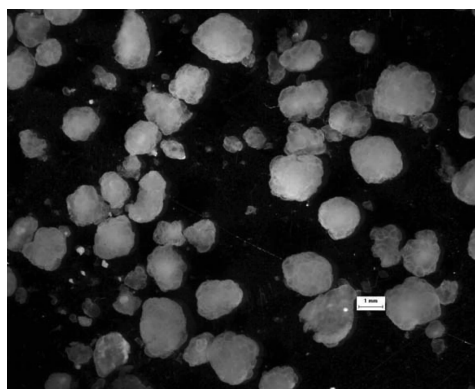


图2 R₂反应器中成熟好氧颗粒污泥形态图

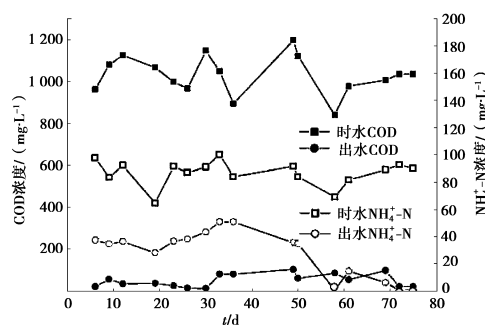


图3 R₁反应器中好氧颗粒污泥COD和氨氮去除效果图

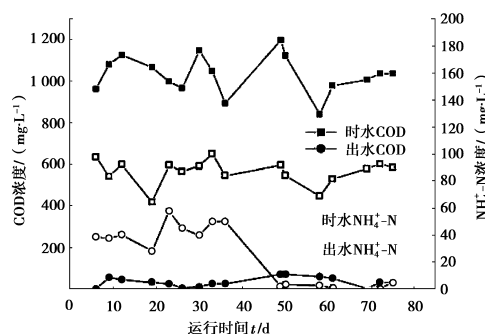


图4 R₂反应器中好氧颗粒污泥COD和氨氮去除效果图

2.3 不同粒径好氧颗粒污泥硝化活性污泥接种效果

为了提高系统氨氮脱除率,将 100 mL 浓度为 8 g/L 的硝化活性污泥直接投加到 R_1 和 R_2 反应器中,以增加系统硝化菌数量。投加结果显示,在 R_1 反应器中,氨氮脱除率逐渐增加,3 周半后系统氨氮脱除率已达到 90% 以上;而在 R_2 反应器中,氨氮脱除率在硝化活性污泥投加两周即达到 90% 以上。通过对比分析 3 个反应器的颗粒污泥状况发现,3 个反应器除了颗粒平均粒径有所差别外,其他操作条件都相同。Liu 等(2005)研究表明,好氧颗粒污泥的比表面积与颗粒粒径大小呈反比。当系统颗粒污泥粒径相对较小时,其比表面积相对大,系统降解速率高;而颗粒粒径相对大时,其比表面积相对小,系统降解速率相对低^[17-18]。在 R_2 反应器中,颗粒粒径相对比较小,污泥浓度高,其系统颗粒污泥相对比表面积大,因此新投加的硝化活性污泥相对附着量大,渗透接种至颗粒污泥中快,系统氨氮脱除率增加迅速;而 R_1 反应器中,颗粒粒径相对大,污泥浓度相对低,其相对比表面积小,硝化活性污泥相对附着量少,渗透接种至颗粒污泥中较慢,因此系统氨氮脱除率增加相对缓慢。

2.4 不同粒径好氧颗粒污泥废水处理周期分析

2.4.1 氨氮脱除过程分析

为了进一步考察不同粒径好氧颗粒污泥氨氮脱除过程的差异,对两个反应器中好氧颗粒污泥的脱氮过程进行了对比研究。图 5 和图 6 显示了 R_1 和 R_2 反应器中好氧颗粒污泥在一个周期内氨氮处理效果图。由图可知,在 2 个反应器反应周期最初 1 h 的缺氧阶段,由上个周期产生的硝酸根全部脱除。在好氧阶段,两个反应器中的氨氮都在 2.5 h 氧化完成。

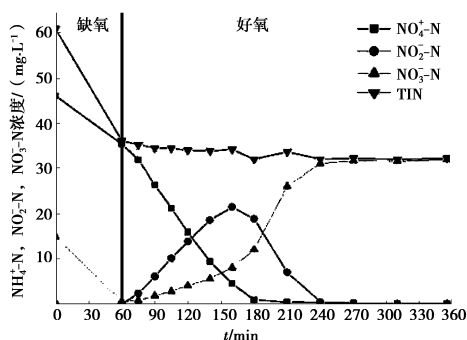


图 5 R_1 反应器中好氧颗粒污泥 COD 和氨氮去除周期分析图
(TIN:总无机氮)

一般来讲,平均粒径较小的好氧颗粒污泥内部缺氧/厌氧区域相对小,好氧区域相对大,其硝化速率应该比平均粒径较大的好氧颗粒污泥快^[12-13]。因此, R_2 中的小粒径好氧颗粒污泥应该具有更快的氨氮氧化速率,氨氮应在相对短的时间内完成硝化反应。而本试验却出现了与上述规律不同的现象,即 R_1 和 R_2 中不同粒径大小的好氧颗粒污泥几乎在相同的时间内完成氨氮的氧化。通过测试数据分析发现,在进行周期分析测试时,由于污泥浓度的波动, R_1 中污泥浓度增长至 10 g/L,而 R_2 中颗粒污泥浓度仅为 6 g/L。因此, R_2

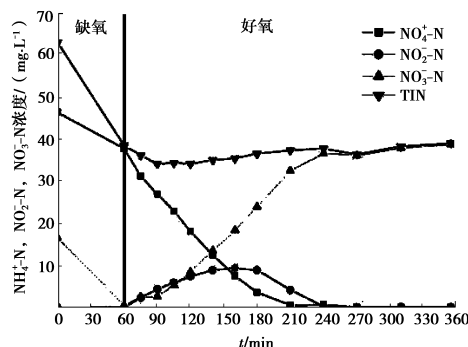


图 6 R_2 反应器中好氧颗粒污泥 COD 和氨氮去除周期分析图
(TIN:总无机氮)

中氨氮硝化时间的延长有可能与 R_2 中颗粒污泥浓度低有关。为进一步证实该推断,对 2 个反应器中颗粒硝化速率进行了对比计算。计算结果表明, R_1 中大粒径好氧颗粒污泥硝化速率为 0.033 d^{-1} ,而 R_2 中小粒径好氧颗粒污泥硝化速率为 0.060 d^{-1} 。小粒径好氧颗粒污泥近两倍于大粒径好氧颗粒污泥的硝化速率说明,小粒径好氧颗粒污泥硝化速率虽然相对快,但其浓度低,从而导致其氨氮氧化时间与大颗粒污泥差不多的现象。

2.4.2 亚硝酸积累状况分析

在硝化过程中,两个反应器中出现了不同程度的亚硝酸积累状况。其中, R_1 反应器中的大颗粒污泥亚硝酸最高积累浓度达到 21.6 mgN/L ,而 R_2 反应器中的小颗粒污泥最高积累浓度只有 9.4 mgN/L 。在生物处理过程中,氨氮的脱除通常由速率较慢的亚硝化过程和速率较快的硝化过程来完成。在好氧过程中,如果系统供氧量充足,以亚硝酸根作为反应物的硝化过程能够很快完成,不会造成亚硝酸积累的状况。当供氧量不足以提供硝化过程时,才会造成一定的积累状况。因此,亚硝酸积累与系统溶解氧量(DO)有很大关系。由于试验期间 R_1 反应器中污泥浓度较高,系统平均供氧量没有 R_2 反应器充足,因而亚硝酸根的氧化过程(硝化)受到了较大的抑制作用,造成严重的亚硝酸积累状况。当 2 个反应器的氨氮几乎降解完毕时,系统亚硝酸积累状况迅速消除。这可以解释为:2 个反应器亚硝化过程进行完毕后,系统含氧量迅速增加,满足了硝化过程的需求,大大提高了系统硝化速率,因此系统亚硝酸被迅速氧化去除。

2.4.3 系统脱氮效果分析

为比较 2 个反应器中颗粒污泥的脱氮效果,对系统总无机氮(TIN)的脱除效果进行了考察。在系统缺氧阶段时,由于具有外部缺氧条件和充足的外加碳源,2 个反应器中由上个周期残留的硝态氮全部被脱除。而在好氧阶段,需要依靠颗粒内部的缺氧区和外碳源进行脱氮时,2 个反应器中的氮脱除很少。一般来讲,依靠单个颗粒污泥进行脱氮时,好氧颗粒污泥系统氮的脱除效果与颗粒粒径大小有关。大颗粒污泥内部缺氧区比小颗粒污泥大,在好氧条件下其反硝化效率相对要高一些,因此大的好氧颗粒污泥具有相对高的脱氮效率^[11-14]。从本系统 TIN 的脱除情况来看, R_1 中大颗粒污泥的脱氮效率比 R_2 中小颗粒污泥脱氮效率相对高一些,即 64.7% 和 57.3%。这与 R_1 中大粒径好氧颗粒污泥内部相对

较大的缺氧区有关。

3 结论

1)在SBR反应器 R_1 和 R_2 中接种了平均粒径大小分别为 $1\ 300\ \mu\text{m}$ 和 $700\ \mu\text{m}$ 的好氧颗粒污泥。颗粒接种硝化活性污泥后,平均粒径小的好氧颗粒污泥,经2周后氨氮脱除率达到90%以上;而平均粒径大的好氧颗粒污泥,经3周半后氨氮脱除率才达到相同水平。

2)当投加硝化活性污泥进行硝化菌接种时, R_1 反应器中颗粒粒径相对大,污泥浓度相对低,其系统颗粒污泥相对比表面积小,硝化活性污泥相对附着量小,渗透接种至颗粒污泥中较慢,因而系统氨氮脱除率增加相对缓慢;而 R_2 反应器中颗粒粒径相对比较小,污泥浓度高,其相对比表面积大,接种活性污泥相对附着量大,渗透接种至颗粒污泥中快,因而系统氨氮脱除率增加迅速。

3)经周期分析发现, R_1 中大粒径好氧颗粒污泥硝化速率为 0.033d^{-1} ,相对 R_2 中小颗粒污泥硝化速率(0.060d^{-1})小。但是,由于 R_1 中污泥浓度为 $10\ \text{g/L}$,相对 R_2 中 $6\ \text{g/L}$ 的颗粒污泥浓度高,两个反应器中的氨氮脱除时间几乎相同。

4) R_1 反应器中的大粒径好氧颗粒污泥内部缺氧区相对 R_2 反应器中的小粒径好氧颗粒污泥,其脱氮效率可达64.7%,比小颗粒污泥的脱氮效率高一些。

参考文献:

[1] Morgenroth E, Sherden T, Wilderer, Aerobic granular sludge in a sequencing batch reactor[J]. *Water Research*, 1997, 31: 3191-3194.

[2] Beun J J, Hendriks A. Aerobic granulation in a sequencing batch reactor[J]. *Water Research*, 1999, 33: 2283-2290.

[3] Jang A, Yoon Y H, Kim I S. Characterization and evaluation of aerobic granules in sequencing batch reactor[J]. *Journal of Biotechnology*, 2003, 105: 71-82.

[4] Tay J H, Liu Q S, Liu Y. Microscopic observation of aerobic granulation in sequential aerobic sludge blanket reactor[J]. *Journal of Applied Microbiology*. 2001, 91: 168-175.

[5] Peng D, Bernet N, Delgenes J P, et al. Aerobic granular sludge—a case study[J]. *Water Research*, 1999, 33: 890-893.

[6] Pan S. Inoculation of microbial granular sludge under aerobic conditions[D]. PhD thesis, Nanyang Technological University, Singapore. 2003

[7] Toh S K, Tay J H, Moy, B Y P. Size-effect on the physical characteristics of the aerobic granule in a SBR[J]. *Applied Mi-*

crobiololy Biotechnology, 2003, 60: 687-695.

- [8] Liu Y Q, Liu Y, Tay J H. Relationship between size and mass transfer resistance in aerobic granules[J]. *Letters of Applied Microbiology*, 2005, 40: 312-315.
- [9] Chen F Y, Liu Y Q, Tay J H, et al. Operational strategies for nitrogen removal in granular sequencing batch reactor[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 189: 342-348.
- [10] Kishida N, Kim J, Tsuneda S, et al. Anaerobic/oxic/anoxic granular sludge process as an effective nutrient removal process utilizing denitrifying polyphosphate-accumulating organisms[J]. *Water Research*, 2006, 40: 2303-2310.
- [11] Tay J H, Ivanov V, Pan S. Specific layers in aerobically grown microbial granules[J]. *Applied Microbiology Letters*, 2002, 40: 254-257.
- [12] Kreuk M K, Picioreanu C, Hosseini J B. Kinetic model of a granular sludge SBR: Influences on nutrient removal[J]. *Biotechnology & Bioengineering*, 97 (2007) 801-815.
- [13] Heijnen J J. Simultaneous COD, nitrogen, and phosphate removal by aerobic granular sludge[J]. *Biotechnology & Bioengineering*, 2005, 90: 761-769.
- [14] Yilmaz G, Lemaire R, Keller J, et al. Simultaneous nitrification, denitrification, and phosphorus removal from nutrient-rich industrial wastewater using granular sludge[J]. *Biotechnology & Bioengineering*, 2008, 100: 529-541.
- [15] Yang S F, Tay J H, Liu Y. A novel granular sludge sequencing batch reactor for removal of organic and nitrogen from wastewater[J]. *Journal of Biotechnology*, 2003, 106: 77-86.
- [16] Yang S F, Tay J H, Liu Y. Effect of substrate nitrogen/chemical oxygen demand ratio on the formation of aerobic granules[J]. *Journal of Environmental Engineering-Asce*, 2005, 131: 86-92.
- [17] Liu Y, Liu Y Q, Wang Z H, et al. Influence of substrate surface loading on the kinetic behaviour of aerobic granules[J]. *Biotechnological Products and Process Engineering*, 2005, (67): 484-488
- [18] 牟丽婷, 黄钧. 好氧颗粒污泥及其脱氮功能的研究进展. *中国给水排水*. 2009, (25): 21-26.
- Mou Liping, Huang Jun. Research on aerobic granular sludge and its denitrification function in sequencing batch reactor. *China Water Supply and Discharge*. 2009, (25)2: 21-26

(编辑 侯湘)