

试验研究

序批式生物膜反应器的同步硝化反硝化研究

荣宏伟^{1,2}, 彭永臻¹, 张朝升², 方 茜²

(1. 北京工业大学北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100022;

2. 广州大学土木工程学院, 广东广州 510006)

[摘要] 序批式生物膜反应器(SBBR)在好氧条件下能创造缺氧微环境,出现同步硝化反硝化现象。为在城市污水处理中实现持久稳定的同步硝化反硝化过程,研究了DO、C/N、温度和pH对SBBR同步硝化反硝化的影响。结果表明:DO是影响同步硝化反硝化重要因素,温度和pH对硝化菌和反硝化菌的生物活性具有明显的抑制作用,在中性和略偏碱性时可较好地实现同步硝化反硝化。

[关键词] 序批式生物膜反应器;同步硝化反硝化;溶解氧

[中图分类号] X703.1 [文献标识码] A [文章编号] 1005-829X(2008)11-0009-04

Study on the nitrogen removal by simultaneous nitrification and denitrification in sequencing batch biofilm reactor

Rong Hongwei^{1,2}, Peng Yongzhen¹, Zhang Chaosheng², Fang Qian²

(1. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2. School of Civil Engineering, Guangzhou

University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The sequencing batch biofilm reactor(SBBR) can create an anoxic micro environment under aerobic conditions and has better performance of simultaneous nitrification and denitrification(SND). In order to achieve steady nitrification and denitrification process for a long time during domestic sewage treatment, the effect of DO, C/N ratio, temperature and pH on the process in SBBR has been investigated. The results show that DO is an influential factor which affects simultaneous nitrification and denitrification. It is found that temperature and pH can obviously inhibit the biological activity of nitrifying bacteria and denitrifying bacteria. Simultaneous nitrification and denitrification could be realized better, pH is neutral and/or a bit alkaline.

Key words: sequencing batch biofilm reactor; simultaneous nitrification and denitrification; dissolved oxygen

生物脱氮被公认为是目前废水脱氮处理中经济、有效的方法之一。传统的生物脱氮是通过硝化和反硝化两个过程来实现的。由于硝化细菌和反硝化细菌生长条件不同,在生物法处理工艺中,硝化和反硝化往往在两个不同的反应器内或同一反应器的不同阶段进行。近年来研究表明,硝化和反硝化这两个过程能够在同一反应器中同时发生^[1-8],证明了存在同步硝化反硝化,由于同步硝化反硝化(SND)具有节省碳源及运行费用低等优点,为此国内外学者正在积极研究开发SND的生物脱氮技术。序批式生物膜反应器(SBBR)是一种兼具SBR和生

物膜特点的新型污水处理工艺^[9],它是在序批式活性污泥法(SBR)的基础上,遵循SBR的操作方式,在反应器内装有不同的填料,作为微生物附着生长的载体,活性污泥在填料上形成生物膜。生物膜不仅为世代时间较长的硝化菌提供了良好的生长条件,同时在一定的好氧条件下,由于水中的溶解氧(DO)可能无法渗入生物膜内,在膜内部可形成缺氧区,又易于反硝化细菌的生长。因此,如果各种因素控制的比较好,可以在生物膜内同时形成好氧区和缺氧区,从而实现SND。笔者通过试验,考察了DO、C/N、温度和pH等因素对SBBR中SND的影响,并给

[基金项目] 国家自然科学基金(50578044);广东省自然科学基金博士启动基金(5300438);建设部研究开发项目(06-k4-01)

出SBBR 优化运行的初步建议。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置

反应器由有机玻璃制成,填料选用组合纤维填料,柱体内径约 15 cm,有效水深约 120 cm,有效容积为 17 L,曝气采用微孔曝气,转子流量计调节曝气量,用温控仪和加热器调控水温。填料选用由高分子聚合塑料和全醛化合成维纶纤维长丝组成的组合纤维填料。填料直径 150 mm,比表面积 $1\ 236\ \text{m}^2/\text{m}^3$,空隙率 99%,成品密度 $8\sim 9\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。反应器内共安置了 12 片组合纤维填料,每片间距 60 mm。试验装置如图 1 所示。

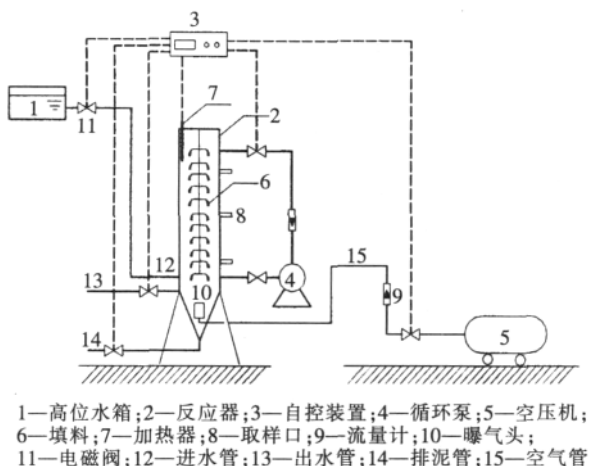


图 1 序批式生物膜法试验装置

1.2 试验水质与分析方法

试验采用人工配水,分别以淀粉、氯化铵、磷酸二氢钾为碳源、氮源和磷源,同时添加硫酸镁、氯化钙、氯化铁等作为微量元素,通过改变化合物的投加量调节进水 C、N、P 浓度。试验水质根据具体的试验需要进行配制。水样经过滤后直接测定,测定方法分别为:COD,重铬酸钾消解法;氨氮,纳氏试剂光度法;亚硝酸盐氮,*N*-(1-萘基)-乙二胺光度法;硝酸盐氮,麝香草酚分光光度法;DO、pH,德国 WTW 在线监测仪。

1.3 试验方法

SBBR 试验运行采用瞬间进水,曝气 5.0 h,静沉 20 min,排水 10 min,运行周期 5.5 h。在试验过程中进出水采用全换容方式。

2 结果与讨论

2.1 DO 对同步硝化反硝化的影响

试验每周期进水水质:COD 250 mg/L 左右,氨氮 30 mg/L 左右,TP 4.5 mg/L 左右,pH 控制在 6.8~7.2,温度控制在 25 ℃,通过调整曝气量使整个曝气过程中 DO 分别控制在 1.8、2.8、4.0、4.7、5.8 mg/L 左右,考察了不同 DO 对同步硝化反硝化的影响,实验结果如表 1 所示。由表 1 可以看出,在 SBBR 中存在着同步硝化反硝化现象,在 DO 浓度较低条件下,氧的穿透能力弱,再加上水膜的存在,导致氧不能完全扩散到生物膜内部,在生物膜中存在一定的缺氧

表 1 DO 对同步硝化反硝化的影响

DO/(mg·L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/(mg·L ⁻¹)		NH ₄ ⁺ -N 去除率/%	NO ₂ ⁻ -N/(mg·L ⁻¹)		NO ₃ ⁻ -N/(mg·L ⁻¹)		TN/(mg·L ⁻¹)		TN 去除率/%
	进水	出水		进水	出水	进水	出水	进水	出水	
1.3	29.61	18.60	37.18	0.16	0.11	0.75	1.57	31.85	21.82	31.49
1.8	30.02	13.18	56.09	0.27	0.76	1.03	2.62	32.78	17.73	45.91
2.8	31.68	4.64	85.35	0.16	1.15	0.57	4.93	34.75	11.40	67.17
3.5	30.02	0.51	98.30	0.29	0.76	0.84	6.26	33.64	7.73	77.02
4.0	28.72	0.22	99.23	0.32	1.25	0.91	8.47	33.59	10.12	69.87
4.5	32.12	0.47	98.49	0.12	0.56	1.16	12.09	35.17	14.83	57.83
5.0	29.74	0.31	98.96	0.69	0.81	1.36	17.59	32.41	19.52	39.77

微环境,利于反硝化的发生;但较低的 DO 浓度会制约硝化细菌活性,降低硝化速率。DO 浓度的增加能提高 DO 对生物膜的穿透力,增加生物膜内部的 DO 浓度,并使存在于生物膜内部的硝化细菌的活性增强,因而提高了硝化反应速率。但同时缺氧微环境逐步缩小,反硝化反应受到抑制,因此硝态氮的出水浓度随之升高。

综上所述,DO 是影响同步硝化反硝化的一个重要因素,在不影响硝化效果的前提下,DO 的降低有助于保持生物膜内的缺氧环境,提高反硝化能力。因此将 DO 控制在 2.8~4.0 mg/L,既能保证硝化反应

的顺利进行,又能较好实现反硝化反应,使硝化速率和反硝化速率越接近,总氮的去除效果就越好。

2.2 C/N 对同步硝化反硝化的影响

有机碳源作为异养好氧菌和反硝化过程的电子受体,在污水生物脱氮处理中起着重要的作用,它是细菌代谢必需的物质和能量来源,是反硝化反应得以有效进行的必备条件。试验控制 DO 在 3.5 mg/L 左右,维持进水氨氮质量浓度为 30 mg/L 的情况下,改变进水中 COD 分别为 120、200、300、400、480 mg/L 左右(对应 C/N 分别为 4.0、6.7、10.0、13.3、16.0)进行试验,考察了 C/N 对同步硝化反硝

化的影响。试验结果如图 2 所示。

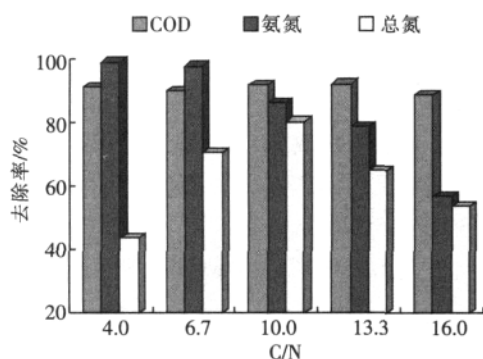


图 2 C/N 对同步硝化反硝化的影响

从图 2 可以看出,随着 C/N 的升高,COD 去除率相差无几,分别为 91.37%、90.25%、91.82%、92.40%、88.73%;氨氮的去除率则随着有机物浓度的升高而明显下降,分别为 99.23%、98.04%、86.16%、78.64%、56.87%;而 TN 去除率先随 C/N 的升高而逐渐提高,但当 COD 平均浓度达到 400 mg/L,C/N 为 13.3 时,去除效果开始下降,在不同 C/N 条件下,TN 去除率分别为 43.65%、70.82%、80.38%、65.11%、53.62%。

一般认为,当城市污水中 BOD_5/TN 大于 4~6 时,可以认为碳源充足,无需外加碳源,而达到生物脱氮的要求。当用 COD 代替 BOD_5 表示时,认为 COD/TN 大于 7 以上,可以实现反硝化反应。由上述

试验现象分析可发现,在整个反应过程中随着有机碳源的增加,反硝化效果明显增强,但硝化过程却随着 C/N 的提高而呈现出抑制状态,进而影响到 TN 的去除效果。由于硝化菌是自养菌,与异养型细菌相比,硝化菌的产率低,比增长速率小,虽然生物膜可以实现较长的污泥龄,但当 COD 过高时,异养型细菌大量繁殖,并占据了生物膜表面部位,生物膜变厚,而硝化菌难以与异养菌在载体表面竞争生长,大部分处于好氧生物膜内部。随着生物膜厚度的增加,DO 的穿透能力减弱,抑制了硝化菌的活性和生长,形成对硝化作用的竞争性抑制影响,使硝化效果下降,出水氨氮浓度升高,导致总氮去除效果下降。所以要在好氧过程中进行同步硝化反硝化,需通过控制 DO 在生物膜中形成好氧生物膜层和缺氧生物膜层,还要保证进水 COD 适中,防止 C/N 过高使硝化菌的生长受到抑制。

2.3 温度对同步硝化反硝化的影响

试验每周期进水水质为 COD 250 mg/L 左右,氨氮质量浓度 30 mg/L 左右,DO 在 3.5 mg/L 左右,通过温控仪将反应器内温度分别控制在 10、15、20、25、30℃,考察了不同温度对同步硝化反硝化的影响,试验结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出,温度变化对同步硝化反硝

表 2 温度对同步硝化反硝化的影响

温度/℃	$NH_4^+-N/(mg \cdot L^{-1})$		NH_4^+-N 去除率/%	$NO_2^--N/(mg \cdot L^{-1})$		$NO_3^--N/(mg \cdot L^{-1})$		$TN/(mg \cdot L^{-1})$		TN 去除率/%
	进水	出水		进水	出水	进水	出水	进水	出水	
10	30.68	17.86	41.79	0.16	0.38	0.75	5.28	33.54	24.27	27.65
15	30.56	11.59	62.07	0.27	0.27	1.03	7.65	34.36	20.91	39.14
20	32.73	4.99	84.75	0.16	0.63	0.57	6.11	34.59	12.52	61.74
25	30.02	0.51	98.3	0.29	0.76	0.84	6.26	33.64	7.73	77.02
30	31.32	0.81	97.41	0.69	1.21	0.86	4.69	34.23	7.54	77.97

化有一定的影响,由于硝化反应的最适温度为 20~30℃,而反硝化的最适温度为 20~40℃,当温度下降到 15℃以下时,温度对硝化细菌的生物活性具有明显的抑制作用,同时反硝化细菌的增殖速率降低,代谢速率下降,使得出水氨氮去除率较低,硝酸盐氮浓度相对较高。温度升至 20℃以上后,硝化细菌的活性得到了恢复,反硝化细菌的增殖速率和代谢速率升高,降低了出水中的氨氮和硝态氮浓度,总氮的去除率达到了 60%以上。本试验实现同步硝化反硝化的最佳温度应控制在 20~30℃。

2.4 pH 对同步硝化反硝化的影响

当进水 COD 为 250 mg/L 左右,氨氮 30 mg/L 左右,水温 25℃,DO 控制在 3.5 mg/L 左右时,调水的 pH 在 5.5~8.3 之间变化,考察了 pH 对同步硝化

反硝化的影响,结果见图 3。

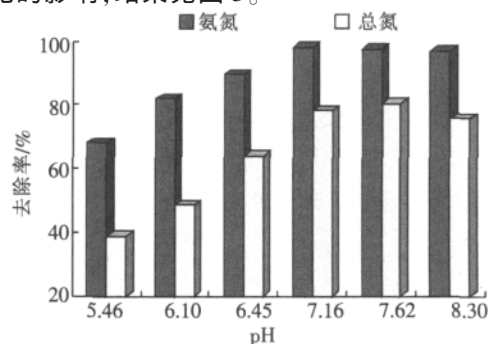


图 3 pH 对同步硝化反硝化的影响

由图 3 可以看出,pH 由 7.16 下降到 5.46 时,氨氮的去除效率呈明显的下降趋势,而 pH 在 7.16~8.30 之间变化时,氨氮的去除效果基本上没有太大的变化。这与文献[9]、[10]的结果一致。在试验中还

发现,当 pH 从 7.16 降至 5.46 后再回升到 7.62 时,氨氮的去除率又迅速升高,并恢复到原有处理水平,说明较低的 pH 只是抑制了硝化细菌的活性而不是对其发生毒害作用。pH 在 6.45~8.30 之间变化时,总氮的去除率基本保持在 60% 以上,但当 pH 高于 7.62 和低于 7.16 时,去除效率有下降的趋势,特别是在 6.10 以下时,去除效率明显降低。总氮去除率的下降一方面是由于硝化能力引起的,另一方面是由于不适宜的 pH 影响到反硝化菌的增殖和活性,pH 高于 7.62 会使反硝化受到抑制,但此时硝化效率依然很高,充足的反硝化底物部分弥补了 pH 对反硝化的抑制,使 TN 的去除率下降幅度并不很明显。因此可以认为,pH 在中性和略偏碱性时有利于在序批式生物膜反应器(SBBR)中实现同步硝化反硝化。

2.5 连续运行 SBBR 的脱氮效果

根据溶解氧浓度、进水有机物浓度、温度和 pH 等因素对 SBBR 同步硝化反硝化的影响分析,分别控制溶解氧在 2.5~4.0 mg/L,COD 200~400 mg/L 左右,TN 27.08~37.46 mg/L,pH 6.8~8.2,温度 25℃ 左右,进行连续运行试验,考察了 SBBR 对总氮的处理效果,结果见图 4。

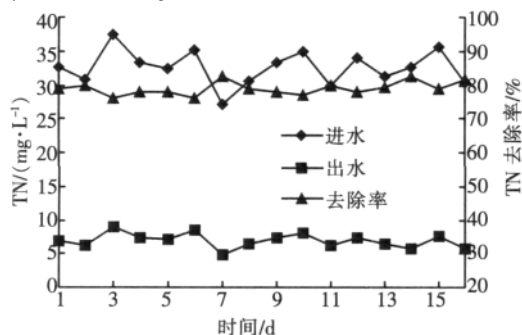


图 4 连续运行期间总氮的去除率

从 TN 的去除效果可以看出,在对溶解氧浓度、进水浓度、温度和 pH 影响因素进行优化控制的情况下,序批式生物膜反应器(SBBR)在好氧条件下实现了持久稳定的同步硝化反硝化(SND)过程,对 TN 的去除率可以达到 74.95%~82.45%。

3 结论

(1)由于硝化菌是自养型好氧菌,反硝化菌是异养型兼性缺氧菌,所以必须保证在序批式生物膜反应器(SBBR)内同时存在好氧区和缺氧区,才能实现同步硝化反硝化。DO 是影响同步硝化反硝化的一个重要因素,DO 直接影响生物膜内部好氧区与缺氧区比例的大小,进而影响硝化和反硝化的效果。在本试验中,将 DO 控制在 2.8~4.0 mg/L 的范围内,

可以取得较好同步硝化反硝化效果,氨氮和总氮的平均去除率分别为 85% 和 65% 以上。

(2)由于同步硝化反硝化是由自养菌和异养菌共同作用的结果,所以进水 C/N 适中才能达到较好的同步硝化反硝化效果。在进水 COD 为 200~400 mg/L,C/N 为 6.7~13.3 时,氨氮和总氮的去除率分别达到 78% 和 65% 以上。

(3)温度和 pH 对硝化菌和反硝化菌的生物活性具有明显的抑制作用,是影响同步硝化反硝化的重要因子,温度为 20~30℃、pH 中性和略偏碱性时可实现同步硝化反硝化。

(4)通过对溶解氧浓度、进水浓度、温度和 pH 影响因素的优化控制,连续运行的 SBBR 可实现稳定的同步硝化反硝化脱氮效果,TN 去除率达到 74.95%~82.45%。

[参考文献]

- [1] Modin O, Fukushi K, Yamamoto K. Denitrification with methane as external carbon source [J]. Water Research, 2007, 41 (12): 2726-2738.
- [2] Gao S, Peng Y, Wang S, et al. Novel strategy of nitrogen removal from domestic wastewater using pilot Orbal oxidation ditch [J]. Journal of Environmental Sciences, 2006, 18(5): 833-839.
- [3] Wang X, Xia S, Chen L, et al. Nutrients removal from municipal wastewater by chemical precipitation in a moving bed biofilm reactor [J]. Process Biochemistry, 2006, 41 (4): 824-828.
- [4] Semmens M J, Shanahan J, Dahm K, et al. COD and nitrogen removal by biofilms growing on gas permeable membranes [J]. Water Research, 2003, 37(18): 4343-4350.
- [5] 杨麒, 李小明, 曾光明, 等. 好氧颗粒污泥实现同步硝化反硝化 [J]. 城市环境与城市生态, 2003, 16(1): 40-42.
- [6] Nakhla G, Farooq S. Simultaneous nitrification-denitrification in slow sand filters [J]. Journal of Hazardous Materials, 2003, 96(1): 291-303.
- [7] Gupta A B, Gupta S K. Simultaneous carbon and nitrogen removal from high strength domestic wastewater in an aerobic RBC biofilm [J]. Water Research, 2001, 35(7): 1714-1722.
- [8] Gonzalez-Martinez S, Wilderer P A. Phosphate removal in a biofilm reactor [J]. Water Sci. Technol., 1990, 23(7-9): 1405-1415.
- [9] Antoniou P, Hamilton J, Koopman B, et al. Effect of temperature and pH on the effective maximum specific growth rate of nitrifying bacteria [J]. Water Research, 1990, 24(1): 97-101.
- [10] Painter H, Loveless J. Effect of temperature and pH on the growth-rate contents of nitrifying bacteria in the activated sludge process [J]. Water Research, 1983, 17(3): 237-248.

[作者简介] 荣宏伟(1973—), 副教授, 博士。电话: 13688868755, E-mail: rhwcn@139.com, rhwcn@126.com。

[收稿日期] 2008-07-12(修改稿)