



反应器分区提高生物接触氧化硝化性能的研究

李先宁^{1*}, 宋海亮¹, 吕锡武¹, 西村 修² (1.东南大学环境科学与工程系, 江苏 南京 210096; 2.日本东北大学, 日本 仙台 980-77)

摘要: 为克服普通生物接触氧化反应器中因硝化菌与有机物降解菌的竞争劣势而影响硝化活性的问题, 将反应器简单分隔, 通过微生物生态调控, 以提高硝化性能。结果表明, 在 BOD、TN 负荷分别为 1.0、0.19kg/(m³·d) 的中等负荷条件下, 反应器分区后硝化率提高 33%。反应器两区分别形成以降解有机物和硝化为主的功能区。分区式接触氧化反应器后区段的硝化速率是单区式反应器的 2.8~4.5 倍, 亚硝酸菌密度提高 1 个数量级。分区式反应器在 0.26kg/(m³·d) 的高 TN 负荷条件下运行时, 由于硝化细菌活性降低导致硝化率降低, 而在 0.08kg/(m³·d) 的低负荷条件下运行时, 后区段过低的氨氮浓度限制了硝化能力的发挥, 因此分区式反应器宜在中等负荷下运行。

关键词: 生物接触氧化反应器; 反应器分区; 硝化作用; 硝酸菌; 亚硝酸菌

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2006)01-0062-05

Studies on the reactor-compartmenting enhancing the nitrification property of biologic contact oxidation. LI Xian-ning^{1*}, SONG Hai-liang¹, LU Xi-wu¹, OSAMU NISHIMURA² (1.Department of Environmental Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2.Tohoku University, Sendai 980-77, Japan). *China Environmental Science*, 2006,26(1): 62~66

Abstract: In order to overcome the problem of competing inferiority of nitrification bacterium to organism degradation bacterium influencing the nitrification activity in common contact oxidation, the reactor was isolated simply and the characteristics of enhancing the nitrification property through microbial ecological control was studied. Under the condition of medium loading of BOD 1.0kg/(m³·d) and TN 0.19kg/(m³·d) respectively, the nitrification rate after reactor-compartmenting was enhanced 33%. These two reactors compartmented formed the function areas of organism degradation main and nitrification main respectively. The nitrifying rate of partitional contact oxidation reactor was 2.8~4.5 times of the single partitional reactor. The density of nitritebacteria enhanced an order of magnitude. When the partitional reactor operating at high TN loading of 0.26kg/(m³·d), its nitrification rate declined due to decrease of nitrifying bacterium activity; while operating at low loading of 0.08kg/(m³·d), the too low NH₄⁺-N concentration of rear-area limited the exertion of nitrification ability; therefore, the compartmenting reactor should be operated under medium loading.

Key words: biologic contact oxidation reactor; reactor-compartmenting; nitrification; nitrate bacteria; nitritebacteria

硝化阶段的硝化率是影响生物脱氮效率的关键因素之一^[1]。生物接触氧化法有利于世代时间较长的硝化细菌生长, 其硝化性能优于活性污泥法。但是, 在普通生物接触氧化反应器中, 一些对环境和营养条件要求不同的细菌混杂生活在相同条件下, 不能充分发挥各自对不同污染物质的净化效能^[2]。例如硝化细菌的比增殖速率比有机物降解菌小数倍甚至数十倍^[3], 严重影响硝化功能的发挥^[4]。有研究采用降低负荷或单独设置硝化反应池等来缓解这一矛盾, 但又导致工程投资及运行费用上升的问题^[5]。基于微生物生态学

原理, 应用微生物生态调控技术, 在曝气池中对不同微生物群落按其不同的环境要求进行适当的功能分区, 提供适合各自的营养及环境条件, 是提高硝化效率的新的思路。本研究采用简单物理分隔法, 将单区式生物接触氧化反应器分隔成前后 2 个区段, 考察其对反应器整体硝化效率的影响, 并从微生物角度探讨其作用机理。

收稿日期: 2005-05-09

基金项目: 国家“十五”重大科技专项(2002AA601012-1A)

* 责任作者, 副教授, lxn@seu.edu.cn

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验装置如图 1 所示,其中接触氧化池总有效容积为 8L.

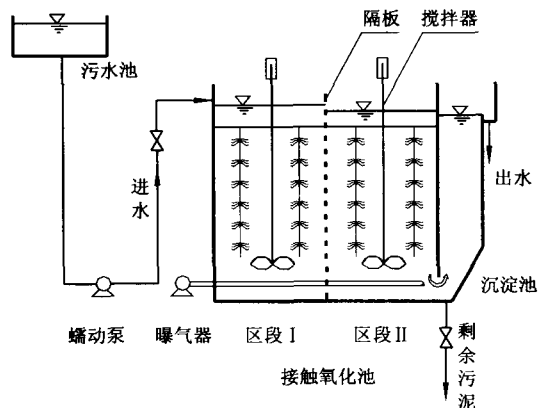


图 1 试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of experiment equipment

装置共 4 组,系统 A 为不分隔的单区式接触氧化池,系统 B、C、D 为分区式接触氧化池,采用隔板将接触氧化池分别按一定比例分隔成独立的接触氧化区段 I 和接触氧化区段 II,两段容积分配为 B(2.6L:5.4L),C(4L:4L),D(5.4L:2.6L). 原水经区段 I 处理后溢流进入区段 II.接触氧化池内各区段均按 45% 的充填率安装直径为 1.6cm 的聚酯纤维绳绳状填料,池底设微孔曝气管.为使反应器内流态接近完全混合型,设置小型搅拌器进行慢速搅拌,系统 A 内均匀布置 2 台,系统 B、C、D 前、后区段各设置 1 台.

1.2 运行条件

试验在 20℃ 的恒温室中进行.试验按 BOD 及 TN 容积负荷设计高、中、低 3 种运行条件,如表 1 所示.试验污水采用人工配制,基本成分有蛋白胨、肉汤干粉、尿素、NaCl、KH₂PO₄、KCl、CaCl₂、MgSO₄ 等.污水水质见表 2.

采集活性污泥进行曝气挂膜,连续运行 1 个月,水质基本稳定后,开始取样分析.TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和 NO₂⁻-N 按国家标准方法测定.TOC、DO 及 pH 值分别采用 TOC-5000(日本岛津)、

TOA-DO-14P(日本东亚)和 TOA-HM-14P(日本东亚)仪器测定.

表 1 不同负荷条件下的运行参数

Table 1 Operational parameters at various volumetric loading rate

处 理	BOD 容积负荷 [kg/(m ³ ·d)]	TN 容积负荷 [kg/(m ³ ·d)]	HRT (h)	DO (mg/L)	pH 值
低负荷	0.5	0.08	12	3.5~6.5	7.4~8.0
中负荷	1.0	0.19	12	2.5~5.0	7.1~8.1
高负荷	1.3	0.26	12	2.0~3.7	7.6~8.3

表 2 试验原水水质

Table 2 The raw water quality

水质组分(mg/L)	BOD 容积负荷[kg/(m ³ ·d)]		
	0.5	1.0	1.3
TOC	144.30	280.40	359.80
TN	40.60	96.20	130.50
NO ₃ ⁻ -N	0.30	0.30	0.40
NO ₂ ⁻ -N	0.04	0.01	0.16
NH ₄ ⁺ -N	6.80	11.50	20.20

1.3 硝化速率测定方法

试验装置停止进水后,在反应器各区段中注入(NH₄)₂SO₄ 溶液,控制水中 NH₄⁺-N 浓度约 20mg/L,搅拌混合后,于 0,30,60,120min 取水样测定其 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 浓度,并通过添加 Ca(HCO₃)₂ 溶液控制水中 pH 值在 7.0~7.5 之间.根据浓度变化及生物量计算硝化速率.

1.4 硝化细菌的测定

取出部分填料刮取生物膜,加入少量灭菌生理盐水,用超声波处理 30s,分散细菌团块.分析硝酸菌与亚硝酸菌均采用免疫法(测定试剂盒,日本产,YAKULUTO 制),即将上述经超声波处理后的混合液加入硝化细菌测定试剂进行测定.

2 结果与讨论

2.1 反应器分区对硝化效果的影响

由图 2 可见,系统 A 处理水 TOC 平均浓度为 9.6mg/L,系统 B、C、D 分别为 10.5,9.5,9.4mg/L,表明分区对有机物去除基本没有影响.系统 A 的硝化率为 52.2%,而系统 B、C、D 出水 NH₄⁺-N

浓度明显低于系统 A,硝化率分别达 86.1%, 88.0%, 85.6%, 比系统 A 均高出 33% 以上。表明分区式接触氧化池整体硝化能力显著提高。

分析区段 I 与区段 II 的水质变化特征,系统 B、C、D 区段 I 出水 TOC 浓度分别为 15.4, 20.8, 14.7 mg/L, 在区段 I 92% 以上的有机物被去除, 形成了以有机物降解为主导的功能区。系统 B、C、D 区段 II 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度均下降到 5.2 mg/L 以下, $\text{NO}_x\text{-N}$ 浓度分别提高到 82.8, 84.7, 82.3 mg/L, 形成了以硝化反应为主导的功能区。可

见,对反应器进行隔板分区后,在前后区段形成不同的水质及负荷条件,区段 I 为高有机物、低氨氮负荷,区段 II 为低有机物、高氨氮负荷,这种分配形式有利于硝化反应的进行。

图 2 还表明,区段 I 有效容积越大,其出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度越高,即 HRT 越长,氨化效果越好;而从区段 II 出水情况看,区段 II 有效容积最大的系统由于停留时间最长,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度最小。因此在本试验范围内两区段容积比为 2.6:5.4 时取得最高的氨氮去除率。

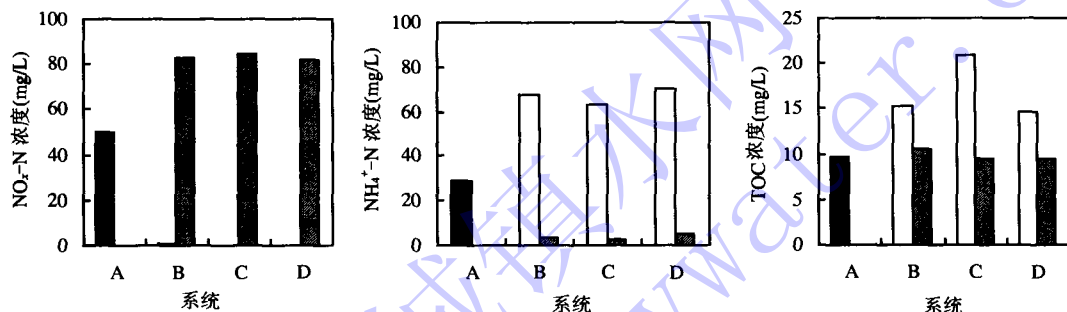


图 2 中负荷条件下系统 A 及系统 B、C、D 区段 I、II 出水污染物浓度

Fig.2 Effluent pollutants concentrations of system A and stage I, II in system B, C, D at medium pollutants loading rate

■ 系统 A 出水 □ 区段 I 出水 ■ 区段 II 出水

2.2 分区对微生物及硝化活性的影响

中负荷条件下系统 A 和系统 B、C、D 区段 II 中生物膜的硝化速率(生物量以生物膜干重计)分别为 0.52, 2.21, 1.44, 2.35 mg/(g·h)。系统 B、C、D 区段 II 的硝化速率为系统 A 的 2.8~4.5 倍。

试验测得系统 A 和系统 B、C、D 区段 II 中亚硝酸菌密度分别为 2.4×10^4 , 6.8×10^5 , 3.4×10^5 , 1.8×10^5 个/mg; 硝酸菌密度分别为 1.5×10^7 , 1.1×10^7 , 2.7×10^7 , 1.4×10^7 个/mg。系统 B、C、D 区段 II 中的硝酸菌密度与系统 A 均基本相同, 而亚硝酸菌比系统 A 高 1 个数量级。观察发现, 系统 A 中主要存在 5 种原生动物, 且在反应器中有机物浓度较高、处理水水质较差时出现的鞭毛虫 *Bodo* sp. 及 *Monas* sp. 为主。而系统 B、C、D 的区段 II 主要观察到 10 种原生动物和 5 种后生动物,

净化水质较好时出现的纤毛虫 *Vorticella* sp. 与 *Opercularia* sp. 大量生长, 而且硝化指示性原生动物^[6] *Arcella* sp. 和 *Euglypha* sp. 为优势种群, *Arcella* sp. 密度最高达 1900 个/mg。微生物相分析证明, 与系统 A 相比, 系统 B、C、D 的区段 II 处于更好的硝化状态。

综合分析分区后硝化能力大幅提高的机理。有机物首先在区段 I 充分降解, 出水中有机物浓度较低而氨氮浓度较高, 为区段 II 的硝化细菌生长提供了良好的物质条件, 生物膜中亚硝酸菌密度明显提高。在有机物较丰富的条件下, 硝化细菌包裹在生物膜内部, 在与有机物降解菌的竞争中无论在溶解氧或营养物的获得上均处于劣势, 硝化活性得不到有效发挥^[7]。试验测得系统 A 中生物膜厚约 3 mm, 而系统 B、C、D 区段 II 中膜厚

平均为 1.0~1.5mm,这正是分区后,有机物降解菌增殖受抑制的结果.有机物降解菌被抑制以及生物膜的变薄均使硝化细菌供氧和营养物质获得条件得到改善;同时区段 II 进水氨氮浓度较高,硝化细菌在营养条件上也处于有利地位.硝化速率得到明显提高.

2.3 负荷对硝化效果的影响

由图 3 可见,高负荷条件下,系统 B、C、D 的区段 I 出水 TOC 与图 2 相比均有所下降,但

TOC 总去除率仍可达 96.4%,且 4 套系统的去除率相差很小.从硝化率上看,系统 A 硝化率为 43.4%,系统 B、C、D 硝化率分别为 54.6%,50.0%和 50.3%,但与中负荷相比系统 B、C、D 的硝化率降低了 31.5%~38.0%.因为高负荷条件下,系统 A 与系统 B、C、D 的硝化速率分别为 0.47,0.51,0.59,0.69mg/(g·h),与中负荷条件相比,系统 B、C、D 的硝化速率明显下降,最大降幅为 31%.

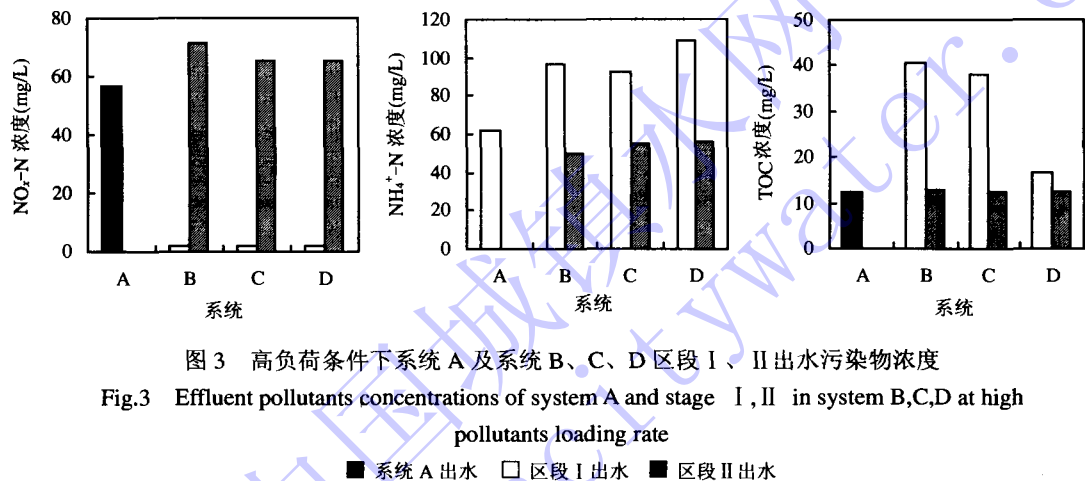


图 3 高负荷条件下系统 A 及系统 B、C、D 区段 I、II 出水污染物浓度

Fig.3 Effluent pollutants concentrations of system A and stage I, II in system B,C,D at high pollutants loading rate

■ 系统 A 出水 □ 区段 I 出水 ■ 区段 II 出水

高负荷条件下系统 A 和系统 B、C、D 区段 II 中亚硝酸菌密度分别为 1.6×10^4 , 1.5×10^5 , 1.3×10^5 , 1.1×10^5 个/mg, 硝酸菌密度分别为 1.1×10^7 , 1.2×10^7 , 1.1×10^7 , 1.3×10^7 个/mg, 与中负荷相比硝酸菌与亚硝酸菌密度均接近, 因此可推论, 导致硝化速率下降的原因不在于硝化细菌密度的改变, 而在于其活性的降低.

区段 II 中同一区域的生物膜厚度在高负荷条件下运行时明显大于中、低负荷条件, 这与进入区段 II 的有机物浓度较高有关. 从另一方面说明, 在硝化池中降低有机物浓度可在一定程度上抑制异养型细菌生长, 有利于硝化细菌活性的发挥, 从而提高整体硝化性能. 此外, 高负荷条件下系统 B、C、D 硝化率尽管与中负荷条件相比大幅下降, 但仍优于系统 A.

由图 4 可见, 在低负荷条件下, 系统 A 出水 TOC 浓度为 6.5mg/L, 系统 B、C、D 出水浓度在 2.6~5.7mg/L 之间, 有机物总去除率均达到 95% 以上. 系统 A 出水中的 NH_4^+-N 浓度为 2.5mg/L, 硝化率为 85.7%; 系统 B、C、D 区段 I 出水在 1.6~1.8mg/L 之间, 区段 II 出水在 0.1~0.2mg/L 之间. 在低负荷条件下分区和不分区的接触氧化池硝化率均较高, 且数值上差别不大.

由于进水 TN 负荷较小, 大部分硝化已在区段 I 完成, 进入区段 II 的 NH_4^+-N 浓度已低于 2.5mg/L, 过低的 NH_4^+-N 浓度使得系统 B、C、D 区段 II 的硝化速率由中负荷条件下的 2.21, 1.44, 2.35mg/(g·h) 分别下降到 0.13, 0.67, 0.99mg/(g·h). 因此分区式生物接触氧化反应器宜在相对较高的 TN 负荷下运行.

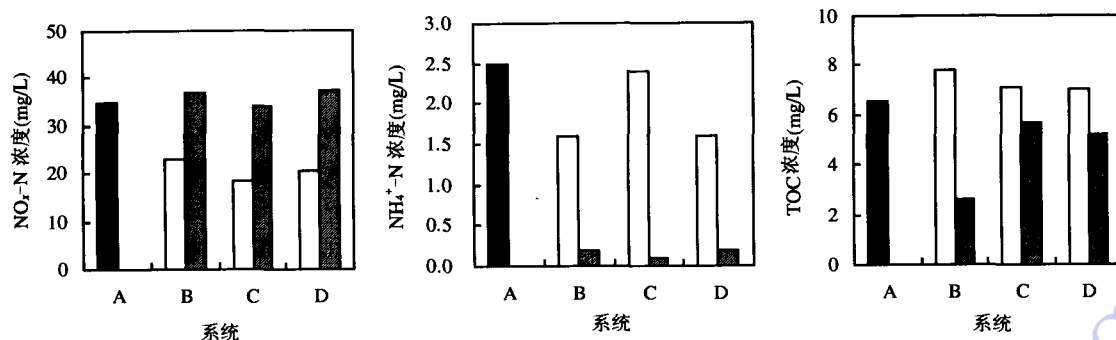


图4 低负荷条件下系统A及系统B、C、D区段I、II出水污染物浓度

Fig.4 Effluent pollutants concentrations of system A and stage I, II in system B,C,D at low pollutants loading rate

■ 系统A出水 □ 区段I出水 ■ 区段II出水

3 结论

3.1 分区式生物接触氧化反应器与单区式相比,硝化率可提高33%。

3.2 反应器分区后,前段去除大部分有机物,为后段提供了低有机物浓度、高氨氮浓度的营养条件,使处于增殖劣势的硝化细菌在溶解氧和氨氮利用上得到改善,由此提高了其活性。

3.3 容积负荷对分区式生物接触氧化反应器的硝化性能影响较大。最佳负荷应设置在 BOD 负荷 $1.0\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 、TN 负荷 $0.19\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 附近。

[6] Li X N, Kohama A, Sudo R. Grazing characteristic of nitrifying bacteria by *Testacealobosia Arcella vulgaris* and its effect on nitrification [J]. J. of Japan Society on Water Environment, 2000,23(11):661-667.

[7] Okabe S, Satoh H, Itoh T, et al. Microbial ecology of sulfate-reducing bacteria in wastewater biofilms analyzed by microelectrodes and FISH technique [J]. Wat. Sci. Technol., 1999,39(7):41-47.

作者简介: 李先宁(1964-),男,江苏南京人,副教授,博士,主要从事水处理技术及环境生态技术研究,发表论文20余篇。

参考文献:

- [1] Kiuru H J, Rautiainen J A. Biological nutrient removal at a very low-loaded activated sludge plant with high biomass concentrations [J]. Wat. Sci. Technol., 1998,38(1):63-70.
- [2] Fruhen M, Christan E, Gujer W, et al. Significance of spatial distribution of microbial species in mixed culture biofilms [J]. Wat. Sci. Technol., 1991,23(7-9):1365-1374.
- [3] Liu Y, Capdeville B. Kinetic behaviors of nitrifying biofilm growth in wastewater nitrification process [J]. Environmental Technology, 1994,15(11):1001-1013.
- [4] Lee L Y, Ong S L, Ng W J. Biofilm morphology and nitrification activities: recovery of nitrifying biofilm particles covered with heterotrophic outgrowth [J]. Bioresource Technology, 2004,95(2): 209-214.
- [5] Gupta A B, Gupta S K. Simultaneous carbon and nitrogen removal from high strength domestic wastewater in an aerobic RBC biofilm [J]. Wat. Res., 2001,35(7):1714-1722.