

# 同步短程硝化反硝化研究

王 磊<sup>1</sup>, 吴 蓓<sup>2</sup>

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008; 2. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘要** :分析了现有短程硝化反硝化工艺处理高浓度氨氮废水所存在的问题, 试验利用序批式反应器(SBR)的内部水力特性对其进行改造, 以畜禽养殖废水为研究对象, 从宏观上创造同步硝化反硝化(SND)条件, 并实现了同一反应器内短程硝化反硝化的同步进行, 改造后系统 pH 值下降速度减缓, 反硝化效率提高, 最终出水的亚硝酸盐和硝酸盐浓度分别降低了 39% 和 38%。

**关键词** :序批式反应器; 短程硝化; 反硝化; 养猪场废水

**中图分类号** :X703      **文献标识码** :A      **文章编号** :1004-693X(2007)04-0088-03

## Simultaneous short-cut nitrification and denitrification

WANG Lei<sup>1</sup>, WU Bei<sup>2</sup>

(1. Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract** :Problems of short-cut nitrification and denitrification technique in the treatment of wastewater with ammonia nitrogen of high concentration were analyzed. The sequencing batch reactor(SBR) was modified based on its hydraulic characteristics. Taking piggery wastewater as a case, the simultaneous short-cut nitrification and denitrification(SND) condition was provided and the SND in the improved SBR was realized. Comparing with the usual SBR, the pH value of the new system dropped more slowly and the denitrification efficiency was improved. 39% of the nitrite and 38% of the nitrate were removed respectively.

**Key words** :SBR; short-cut nitrification; denitrification; piggery wastewater

随着经济的发展,大量含氮污染物的排放对自然环境造成了严重破坏,新型脱氮工艺研究备受关注。与传统的硝化反硝化相比,短程硝化反硝化工艺是将硝化过程控制在亚硝化阶段,随后在缺氧条件下直接反硝化脱氮,这样可减少 25% 供氧量,反硝化阶段可减少所需碳源 40%,另外还具有以下优点:可缩短反应所需时间,产泥少,节省反应器容积<sup>[1-2]</sup>。因此该工艺也被积极地应用到实际生产中,但在高浓度氨氮废水处理应用中,成功的实例并不多,主要存在两个问题。

**a. 工艺流程控制困难。**目前对短程硝化反硝化的研究中较多采用 SBR 反应器,不管是单一反应器分时段运行,还是 2 段或多段 SBR 串联运行,都是将亚硝化阶段与反硝化阶段在时空上分开进行,

两阶段反应的时空分配对处理效果影响很大。高大文等<sup>[3]</sup>运用氧化还原电位(ORP)和 pH 值指标来指示判断硝化和反硝化的终点,以得到最高效的运行工况,但这对于波动较大的实际废水处理来说应用上还存在困难。

**b. 反硝化效率低。**对于含高浓度氨氮的废水来说,硝化过程控制在亚硝化阶段是相对容易的,关于各种影响因素的研究也较多<sup>[4-5]</sup>,而在实际应用中往往反硝化成为脱氮效率的制约因素,原因是高浓度氨氮废水的硝化过程即使控制在亚硝化阶段同样会消耗大量的碱度,pH 值往往会降的很低,同时碳源在好氧阶段大量减少,使反硝化时碳源不足,反硝化效率大大降低,所以会发现一般采用短程硝化反硝化工艺一个周期反而会变得更长,仍然存在碱度

作者简介:王磊(1980—),男,江苏扬州人,博士研究生,研究方向为水污染控制技术。E-mail: wantonio@tom.com

和碳源的问题。

为克服这些问题,利用 SBR 内部水力特性进行试验改造,以畜禽养殖废水为研究对象,从客观上创造 SND 条件,实现同一反应器内短程硝化反硝化的同步进行。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 反应器改造

本试验利用 SBR 的内部水力特性,对其结构进行改造,见图 1。普通 SBR 内部水力流态并非杂乱无章,水流是按一定的方向与路线循环流动,某种程度上可将其视为一种空间连续流反应器,改造后同一个 SBR 反应器内就形成了一个主好氧区与两个缺氧区,曝气后大部分污泥处在好氧区,进行碳氧化与氨氧化,小部分泥水混合物会随水流流入缺氧区,由于挡板作用,泥水混物流速会大大降低,这样污泥会缓慢沉降,同时耗尽携入的溶解氧,污泥会在底部形成堆积,形成缺氧区。

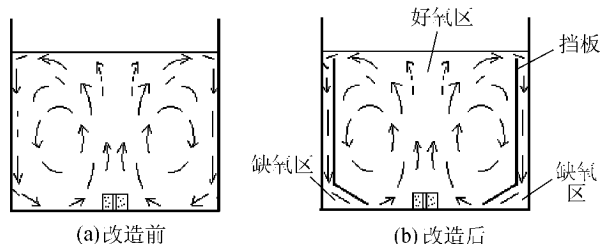
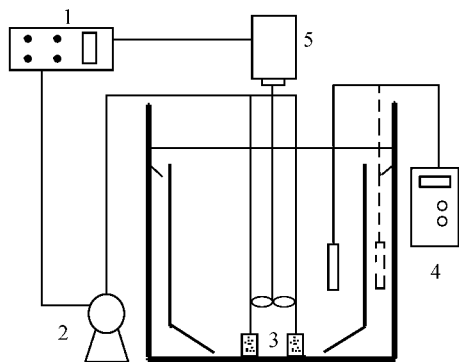


图 1 改造前后 SBR 反应器结构及水流流态示意图

### 1.2 实验装置

SBR 反应器是由体积为 60 L 的正方体玻璃缸、曝气系统、搅拌系统和时间控制器组成,反应器有效容积为 50 L,改造后好氧区约为 35 L,缺氧区为 15 L。曝气系统包括空压机(ACD—009D)和曝气头 2 个(烧结砂芯),搅拌采用 JB90—D 型电动搅拌机,时间控制器采用 TDK0310 电子定时开关控制曝气与搅拌的交替。整个装置如图 2 所示。



1—时间控制器 2—空压机 3—烧结砂芯 4—溶氧仪 5—搅拌机

图 2 SBR 系统装置示意图

### 1.3 试验水质及方法

试验进水采用广东省东莞市一大型养猪场污水

处理站厌氧罐的出水,此水经过水解酸化和厌氧分解两个工艺的处理后,COD 质量浓度有所降低,约为 1000 ~ 1300 mg/L,而氨化作用使得污水中氨氮质量浓度最高值达到约 550 ~ 650 mg/L,试验每周期进水为 20 L,排水比为 0.4。运行工况为:虹吸进水(约 15 min)同时厌氧搅拌 2 h + 曝气 4 h + 厌氧搅拌 2 h + 曝气 4 h + 沉淀 0.5 h + 排水 0.5 h + 闲置 0.5 h。试验采用两组反应器,SBRI 为未改造反应器,主要进行分时段短程硝化反硝化试验,SBRII 为改造后反应器,主要进行同步短程硝化反硝化试验。两反应器好氧部分溶解氧质量浓度都控制在 0.2 ~ 0.5 mg/L。

分析项目与指标为:COD<sub>Cr</sub>,重铬酸钾法;氨氮,纳氏试剂比色法;NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N,α-萘胺比色法;NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N,酚二磺酸比色法;pH 值,便携式 pH 值计(PHB-3 型);溶解氧 DO,便携式溶氧仪(JPB-607);MLSS,重量法。

## 2 结果与分析

### 2.1 反应器启动

启动阶段采用两个相同的未改造 SBR 反应器进行培养驯化,接种污泥为现场接触氧化池的剩余污泥,用现场厌氧罐出水并稀释后作为 SBR 进水,COD 质量浓度控制在 800 mg/L 以下,氨氮质量浓度控制在 350 mg/L 以下,经过约 25 d 的污泥培养,COD 和氨氮去除率分别稳定在 85% 与 95% 以上,反应器启动成功。之后将其中一反应器改造,加入隔板,进行两反应器对比试验。

### 2.2 改造后效果

采用未改造反应器(SBRI)与改造后反应器(SBRII),加入同样的最终目标废水进行对比试验。改造后的 SBRII 中缺氧区从 3/5 水深处到底部污泥堆积区,溶解氧为零,创造了反硝化条件。

SBRI 中污水进入后进行缺氧搅拌,由于上周期残留较多的亚硝酸盐与硝酸盐,加上进水带入了充足碳源,使得反硝化反应迅速,同时补充了大量碳酸氢钠,pH 值由 7.0 上升到 8.3,但在第一段好氧过程碱度又被快速消耗,pH 值降到了 7.2,之后的缺氧搅拌中,反硝化效率降低,pH 值上升了 0.3,而后段好氧过程 pH 值下降更为迅速,必须补充碳酸氢钠约 120 mg/L(以 CaCO<sub>3</sub> 计)才能将 pH 值控制在 7.0 以上。同时发现 pH 值低于 6.2 时系统会受到严重抑制,COD、氨氮去除率大大降低。

SBRII 反应器具有 2 个缺氧区,部分在好氧区由氨氧化生成的亚硝酸盐和少量硝酸盐可在缺氧区及时地进行反硝化脱氮,同时可为系统补充碳酸氢钠,延缓了 pH 值下降速度(见图 3),系统不需要外加碳

酸氢钠, pH 值可维持在 6.8 以上。

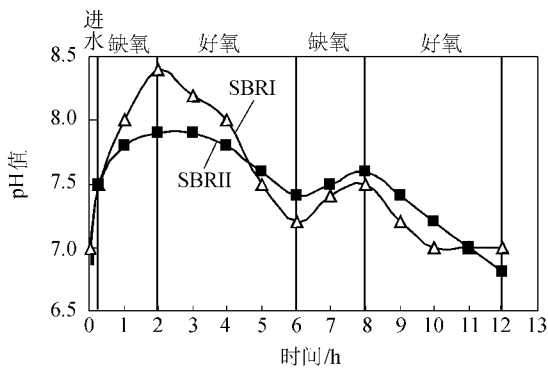


图3 SBRI、SBRII 一周期内系统 pH 值变化曲线

由图 4 可见,前段反应中 SBRI 的氨氧化速度大于 SBRII,分析认为是 SBRII 经过改造后好氧区容积减少所致。SBRI 中随着氨氮质量浓度的降低,系统碱度也迅速消耗,其氨氧化速度逐步降低,而 SBRII 氨氧化速度基本稳定。SBRI 与 SBRII 的最终出水氨氮质量浓度相近,约为 6~10mg/L,都能达到 98% 以上的去除率。再延长曝气时间两反应器氨氮浓度均下降缓慢。说明此条件下都达到了最大氨氮去除率。同时试验发现在进水缺氧搅拌过程中,SBRI、SBRII 中氨氮浓度都减少了 10% 左右,是否是氨氮与上周期残留的硝酸盐、亚硝酸盐发生了厌氧氨氧化还需进一步证实。

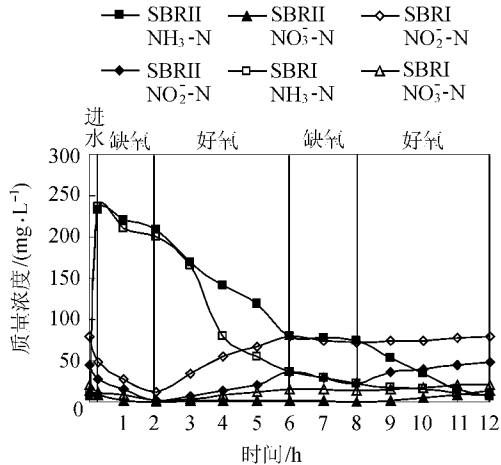


图4 SBRI、SBRII 一周期内  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$  质量浓度变化曲线

在进水和第一段缺氧搅拌中,由于进入的废水含有大量有机碳源,SBRII 中上周期残留的硝酸盐与亚硝酸盐通过反硝化很快被去除,而 SBRI 中由于上周期残留的硝酸盐与亚硝酸盐浓度较高,2h 内不能完全得到去除。后期反应过程中,SBRI、SBRII 在第一段好氧阶段亚硝酸盐迅速积累,硝化反应基本停留在亚硝化阶段,说明在低溶解氧和较高的氨氮浓度环境下硝化菌活性受到抑制,硝酸盐浓度保持在较低水平,但在后段缺氧搅拌中两反应器反硝化效

率都较低,主要是由于碳源不足,进水反硝化与好氧碳氧化都大大降低了可用于反硝化的碳源,而且低 pH 值也在一定程度上抑制了反硝化过程的进行。

在第二段好氧反应过程中,SBRI、SBRII 都出现了硝酸盐浓度上升的情况,这是由于随着 COD 的去除和氨氮浓度降低,碳氧化和氨氧化所需要的氧量逐渐减少,整个系统需氧量降低,溶解氧浓度逐步升高,另外氨氮浓度的降低以及低 pH 值环境下,对硝化菌有抑制作用的游离氨 (FA) 浓度减少,因此硝化细菌受抑制程度相对得到缓解,部分亚硝酸盐被氧化成为硝酸盐。在 SBRII 中,第二段好氧过程亚硝酸盐与硝酸盐积累量大于第一段好氧过程,说明反应器中缺氧区反硝化作用降低,主要原因是:①系统溶解氧浓度上升,缺氧区溶解氧浓度也随之上升,缺氧区域减少;②易于被反硝化利用的碳源已不足。而在 SBRI 中亚硝酸盐与硝酸盐积累相对减缓的原因是后段好氧过程中氨氧化量降低,转化的亚硝酸盐与硝酸盐也随之减少。

相比之下,同样的进水水质和运行模式,SBRII 中亚硝酸盐和硝酸盐浓度始终低于 SBRI,且系统 pH 值变化缓慢,氨氮去除速率稳定,由此可证明改造后反应器在好氧阶段短程硝化和反硝化同步进行,反硝化及时去除了部分好氧区产生的亚硝酸盐与硝酸盐,并补充了一定的碳酸氢钠。

改造前好氧阶段已将大部分可用于反硝化的碳源分解,缺氧搅拌时反硝化碳源却又不足,所以反硝化效率很低。而改造后,有机碳源一部分在好氧区分解,另一部分可在缺氧区被反硝化利用,反硝化可在全程进行,大大提高了反硝化效率,也提高了碳源的有效利用率。与 SBRI 相比,改造后最终出水亚硝酸盐和硝酸盐浓度分别降低了 39% 和 38%,氨氮去除率也略有增加(见表 1),但 COD 去除率有所下降,分析其原因为改造后好氧区减少,分解速度降低。

表1 改造前后处理效果对比

| 阶段  | $\rho(\text{DO})$<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | 出水<br>pH 值 | 外加<br>碳酸氢钠                       | COD 去<br>除率/% | 氨氮去<br>除率/% | $\rho(\text{NO}_2\text{-N})$<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | $\rho(\text{NO}_3\text{-N})$<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) |
|-----|--|------------|----------------------------------|---------------|-------------|---|---|
| 改造前 | 0.2~0.5  | 7.0        | 120mg/L<br>(以 $\text{CaCO}_3$ 计) | 70            | 98          | 79  | 21  |
| 改造后 | 0.2~0.5  | 6.8        | 0                                | 65            | 99          | 48  | 13  |

### 3 结论与讨论

实验结果表明,改造后的 SBR 反应器成功地实现了同一反应器内同时进行短程硝化与反硝化反应,一定程度上克服了一般短程硝化反硝化工艺所存在的碳源与碱度上的问题。另外本试验为经亚硝化的同步硝化反硝化提供了新的实现(下转第94页)

EMC-LR 的平均去除率分别为 37.7% 和 38.9%。天然水体中存在着能降解微囊藻毒素的土著细菌,但由于细菌浓度低,自然降解速度较慢,水体中微囊藻毒素降解 90% 要 30 d<sup>[11]</sup>,而生态混凝土表面富集的微生物在水力停留 6~7 d 后可去除 27.4%~38.9% 的微囊藻毒素。

## 4 结 论

a. 太湖梅梁湾水体中存在较高浓度的 TN 污染,水体介于重度富营养与极度富营养之间,水质为劣 V 类。

b. 生态混凝土对 TN、TP、Chla 平均去除率分别为 36.1%、53.8%、55.5%,对 COD<sub>Mn</sub> 平均去除率为 22.9%,对总藻毒素和胞外藻毒素的去除率在 27.4%~38.9% 之间。水体的富营养状况有所降低,水质提高一个等级。

c. 生态混凝土的方法对太湖梅梁湾富营养化水源地水质有较明显的改善效果。

### 参考文献:

[1] 陈志山,刘选举.生态混凝土净水技术处理生活污水[J].给水排水,2003,29(2):10-13.  
[2] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].4版.

北京:中国环境科学出版社,2002:243-280.

[3] 金相灿,屠清瑛.湖泊富营养化调查规范[M].2版.北京:中国环境科学出版社,1990:160-188.  
[4] 纪荣平,李先宁,吕锡武,等.人工介质富集微生物对藻类和藻毒素降解试验研究[J].东南大学学报:自然科学版,2005,35(3):442-445.  
[5] 范成新,季江,张文华,等.贡湖水质富营养化综合评价及初步预测[J].海洋湖沼通报,1997(3):18-24.  
[6] 李延平,蔡根根.生活饮用水卫生标准实用指南[M].南京:东南大学出版社,2002:87-90.  
[7] 许建华,万英,汤丽华,等.微污染原水的生物接触氧化预处理技术研究[J].同济大学学报,1995,23(4):376-381.  
[8] 季民,刘卫华,周菁,等.微污染水生物陶粒滤池预处理研究[J].工业用水与废水,2003,34(3):22-25.  
[9] 陈志山.用于水污染治理的生态混凝土技术[J].建筑材料学报,2001,4(1):60-64.  
[10] TSUJI K T, WATANUKI T. Stability of microcystins from cyanobacteria-IV effect of chlorination on decomposition[J]. Toxicon, 1997, 35(7):1033-1041.  
[11] LAHTI K, RAPALA J, FARDIG M, et al. Persistence of cyanobacterial hepatotoxin, microcystin-LR in particulate material and dissolved in lake water[J]. Wat Res, 1997, 31(5):1005-1012.

(收稿日期 2006-05-30 编辑:傅伟群)

(上接第 90 页)

途径,目前 SND 主要是通过好氧反硝化菌等生物途径和污泥微环境差异脱氮途径来实现,但这些途径影响因素较复杂,控制难度高。而本实验是对反应器进行改造,从宏观上在同一反应器内创造不同的环境条件,从而实现时空上的同步短程硝化反硝化,易于在工程上应用,为高浓度氨氮废水的处理提供了新的工艺途径和思路。

本实验亦为探索性实验,还有很多问题有待研究,如:改造后好氧区、缺氧区不同比例与不同浓度废水处理效率之间的关系,如何进一步降低亚硝酸盐与硝酸盐出水浓度,是否存在厌氧氨氧化现象及如何利用等等。

### 参考文献:

[1] RUIZ G, JEISON D. Nitrification with high nitrite accumulation

for the treatment of wastewater with high ammonia concentration [J]. Water Research, 2003, 37:1371-1377.

[2] 赵宗升,刘鸿亮,李炳伟,等.高浓度氨氮废水的高效生物脱氮途径[J].中国给水排水,2001,17(5):24-28.  
[3] 高大文,彭永臻,郑庆柱. SBR 工艺中短程硝化反硝化的过程控制[J].中国给水排水,2002,18(11):13-18.  
[4] SUTHERSAN S, GANCZARCCZYK J. Inhibition of nitrite oxidation during nitrification[J]. Water Pollut Res, 1986, 21(2):257-266.  
[5] BAE W, BAEK S, CHUNG J, et al. Optimal operational factors for nitrite accumulation in batchreactors [J]. Biodegradation, 2002, 12(5):359-366.

(收稿日期 2006-06-14 编辑:徐娟)