

# 无外加碳源 SBBR 脱氮工艺及其控制方法研究

李 军<sup>1</sup>, 彭永臻<sup>2</sup>, 顾国维<sup>1</sup>, 韦 苏<sup>3</sup>

(1 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092; 2 北京工业大学 环境与能源工程学院, 北京 100022; 3 浙江工业大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310014)

**摘 要:** 为提高脱氮效果并实现利用内碳源进行反硝化,开展了 SBBR (以好氧—缺氧方式运行)处理生活污水的脱氮研究。在好氧阶段, SBBR 中的生物膜能创造缺氧微环境并吸收、储存碳,实现了同步硝化反硝化,降低了硝态氮的浓度;在缺氧阶段,可利用内碳源实现剩余硝态氮的反硝化。溶解氧浓度的大小对好氧时间、好氧剩余硝态氮浓度和缺氧反应时间有较大影响,因而可以利用在线检测的 DO 作为曝气量控制参数。DO、pH 和 ORP 值的变化具有规律性,反映了生物脱氮过程中耗氧和供氧、产酸和产碱、氧化和还原过程的变化。为准确判断好氧和缺氧反应过程的终点,并减少控制的滞后时间,建议以 pH 值的“氨谷”和 ORP 的“硝酸盐膝”作为主控制特征点分别指示硝化和反硝化的终点,而以 ORP 的“氨肘”和 pH 值的“硝酸盐峰”作为参考或辅助控制特征点。

**关键词:** SBBR; 碳源; 硝化; 反硝化; DO; pH; ORP; 控制

**中图分类号:** X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2006)07-0017-05

## Nitrogen Removal without External Carbon Source in SBBR and Its Control

LI Jun<sup>1</sup>, PENG Yong-zhen<sup>2</sup>, GU Guo-wei<sup>1</sup>, WEI Su<sup>3</sup>

(1 School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2 College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 3 College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** Aiming to improve the removal of nitrogen and denitrify without adding external carbon source, an aerobic/anoxic SBBR was used to treat domestic wastewater for nitrogen removal. In the aerobic phase, carrier biofilm adsorbs and stores carbon for good nitrification and denitrification and less residual nitrate in the SBBR. In the anoxic phase, without adding external carbon source, internal carbon source is used for denitrification. DO in the SBBR affects aerobic time, residual nitrate and anoxic time. Online DO can be used as control parameter for aeration amount. The variations of DO, ORP and pH are relevant to biological process for nitrogen removal in the SBBR. These variations correspond to consumption and supply of oxygen, change of acid and alkali, and process of redox. In order to judge the end of nitrification and denitrification effectively, and decrease time for controlling lag, the ammonia valley of pH and the nitrate knee of ORP are used as main controlling parameters for nitrification and denitrification.

**基金项目:** 国家自然科学基金重点资助项目 (50138010); 北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室开放基金资助项目

respectively. The ammonia elbows of ORP and the nitrate apex of pH are used as assistant control parameters

**Key words:** SBBR; carbon source; nitrification; denitrification; DO; pH; ORP; control

传统的生物脱氮一般采取缺氧—好氧的运行方式,通过将硝化液部分回流到缺氧池,利用进水中的碳源进行反硝化来实现。但这种方式往往会造成出水硝态氮的泄漏,增大回流量则存在能耗高等问题。

序批式生物膜反应器 SBBR (Sequencing batch bionfilm reactor)是通过向序批式反应器 (SBR)中添加载体而形成的一种新型污水处理工艺,采用其进行脱氮具有两个重要特点:微生物附着生长,易生成世代长而有利于硝化的微生物;生物膜能创造缺氧微环境,有利于在好氧情况下实现同步硝化反硝化 (SND) [1~5]。

污水的生物处理是一个非稳定的过程,选择合适的控制方法尤为重要 [6]。由于生物脱氮包括供氧和耗氧的过程,同时伴随着氧化还原反应和酸、碱度的变化,故选择 DO、ORP 及 pH 值作为控制参数 [7~11],考察了 SBBR 处理生活污水的脱氮效果。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验装置

SBBR 试验装置已使用了近 5 年 [12],如图 1 所示。

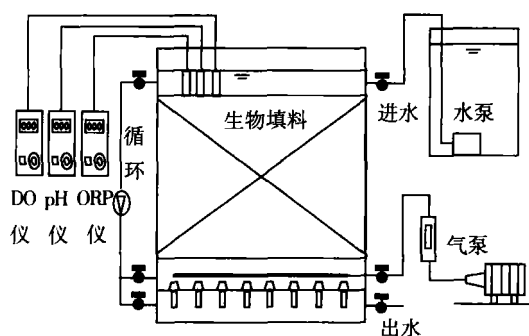


图 1 SBBR 试验装置

Fig 1 Schematic diagram of SBBR equipment

反应器采用有机玻璃制成,有效容积为 200 L,尺寸为 80 cm × 40 cm × 110 cm。底部设有滤板、滤头,反应器内装有鲍尔环填料 (供生物挂膜)。采用穿孔管曝气,通过气泵供气;设置水泵完成水循环 (在反冲洗阶段执行反冲洗水泵功能)。反应器中安装了 DO、ORP、pH 自动检测仪。

### 1.2 试验用水

原水取自某大楼的化粪池,控制反应器进水温度在 18 ~ 22 °C,其他水质指标: COD = 300 ~ 1 388 mg/L, BOD<sub>5</sub> = 150 ~ 700 mg/L, SS = 100 ~ 140 mg/L, NH<sub>3</sub> - N = 10 ~ 151 mg/L, TN = 20 ~ 180 mg/L, TP = 4 ~ 15 mg/L。

### 1.3 试验方法

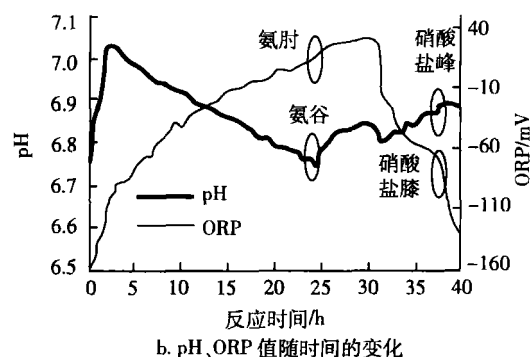
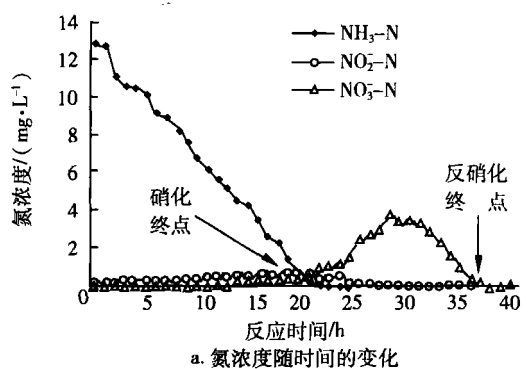
SBBR 工艺的操作工序:进水 → 曝气 → 缺氧 → 出水。试验过程中不外加任何碳源,进、出水采用了 1/3 的换容方式。需要说明的是,缺氧在这里代表停止曝气。

运行过程中检测 COD、氮浓度以及 DO、ORP、pH 值的变化,水质参数的测定均采用国家标准方法。

## 2 试验结果

### 2.1 低曝气量下氮及检测参数值随时间的变化

图 2 显示了在低曝气量下,反应过程中各种氮及 DO、pH、ORP 值的变化情况 (进水氨氮浓度为 71.2 mg/L)



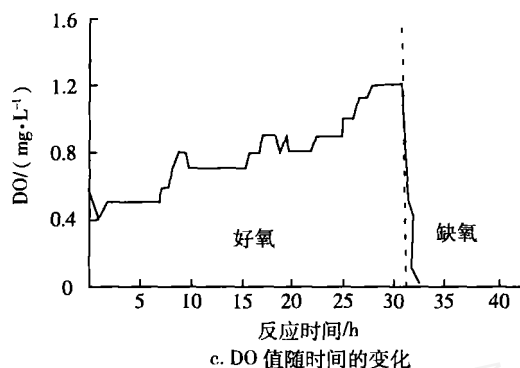


图 2 低曝气量下氮及 DO、pH、ORP值随时间的变化

Fig 2 Variation of nitrogen content, DO, pH and ORP value with time under condition of low aeration intensity

### 2.1.1 好氧阶段

反应初期由于稀释、吹脱、吸附和降解作用,  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度从 71.2 mg/L 迅速下降到 12.9 mg/L, 之后随着反应时间的延长则其浓度逐步下降, 并在 23 h 左右时降至零。在反应开始后的 21 h 内  $\text{NO}_2^-$  - N 浓度由 0.01 mg/L 上升到 0.54 mg/L, 然后下降到 0.05 mg/L; 硝酸盐氮随着反应时间的进行逐步增加, 31 h 后达到 3.74 mg/L 的最大值。

DO 浓度在前 24 h 缓慢增长, 并经历了 0.5、0.6、0.8 mg/L 三个平台; 此后 DO 浓度突然升高到 28 h 点的 1.2 mg/L 左右, 并随时间的延长保持基本不变。

对 ORP 而言, 在前 3 h 其值大幅上升, 接下来的 20 h 则增长缓慢, 随后又快速上升并于 28 h 的点达到 28 mV 的高值, 此后基本保持不变或微长, 形成了“氨肘”。

pH 值在最初的 2 h 内大幅上升, 然后转为下降, 24 h 后转为快速上升, 形成“氨谷”。

### 2.1.2 缺氧阶段

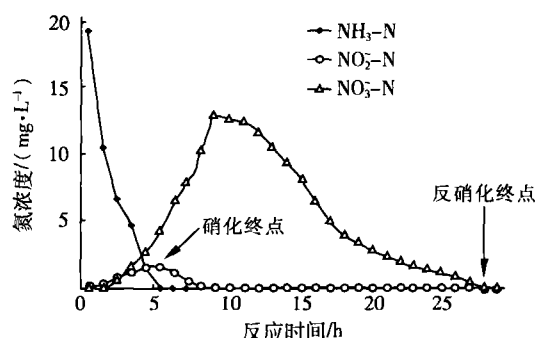
$\text{NO}_2^-$  - N 浓度在反应开始后缓慢下降到零;  $\text{NO}_3^-$  - N 浓度随着反应的进行逐步减少, 并于 38 h 左右减小到零。

DO 浓度基本为零。在最初的 2 h 内 ORP 值大幅下降; 接下来到 38 h 处缓慢减小 (类似一个斜平台), 到 39 h 处又快速降落, 而后又趋缓, 形成了“硝酸盐膝”。pH 在开始的 1 h 处达到最高值 (6.88), 之后基本不变或略有下降, 形成了“硝酸盐峰”。

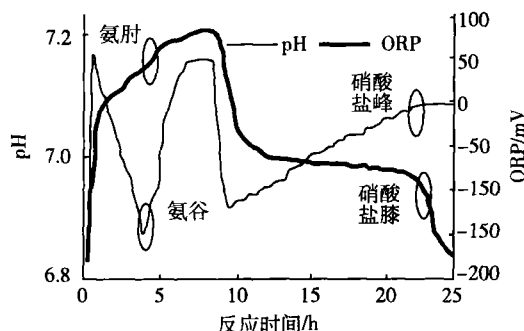
### 2.2 高曝气量下氮及检测参数值随时间的变化

图 3 显示了在高曝气量下反应过程中氮浓度及

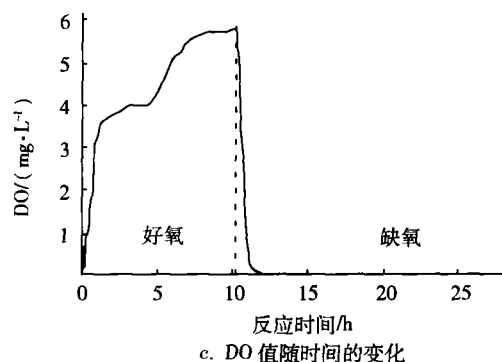
DO、pH、ORP 值的变化情况。



a. 氮浓度随时间的变化



b. pH 和 ORP 值随时间的变化



c. DO 值随时间的变化

图 3 高曝气量下氮及 DO、pH、ORP 值随时间的变化

Fig 3 Variation of nitrogen, DO, pH and ORP value with time under condition of high aeration intensity

由图 3 可知, 其变化规律与低曝气量的基本相似, 但也存在一些不同:

硝化时间短,  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度在 5 h 内即降至零 (进水为 107 mg/L);

好氧结束后的  $\text{NO}_3^-$  - N 浓度更高, 因而增加了缺氧反硝化的时间。

### 2.3 连续反应批次的检测结果

图 4 显示了整个反应过程中 pH 和 ORP 值的变化。

表 1 为连续反应批次下的脱氮结果。

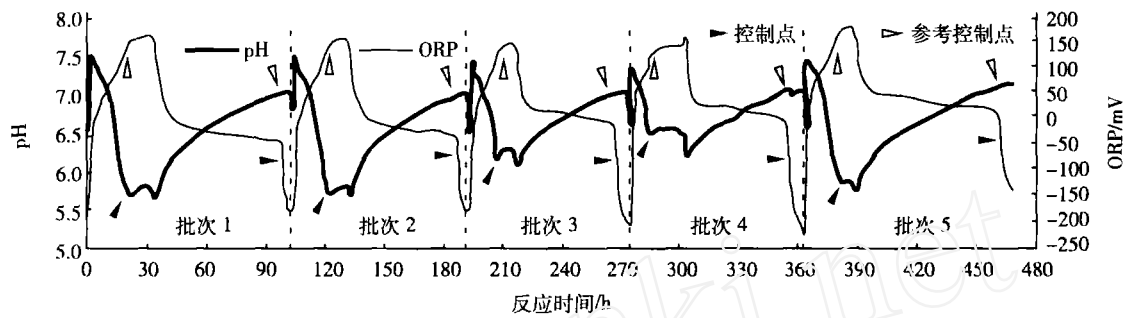


图 4 连续反应批次的 pH、ORP 值变化及控制特征点

Fig 4 Variation of pH, ORP value and characteristic point in continuous sequencing treatment

表 1 连续反应批次的处理结果

Tab 1 Results of continuous sequencing treatment

|    |    | mg · L <sup>-1</sup> |                     |                                  |                                  |
|----|----|----------------------|---------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 批次 |    | COD                  | NH <sub>3</sub> - N | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> - N | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> - N |
| 1  | 进水 | 1 150                | 116.3               |                                  |                                  |
|    | 出水 | 72                   | 4.2                 | 0                                | 0                                |
| 2  | 进水 | 1 231                | 93.1                |                                  |                                  |
|    | 出水 | 83                   | 4.1                 | 0                                | 0                                |
| 3  | 进水 | 784                  | 86.8                |                                  |                                  |
|    | 出水 | 87                   | 2.3                 | 0                                | 0                                |
| 4  | 进水 | 606                  | 52.3                |                                  |                                  |
|    | 出水 | 71                   | 0.4                 | 0                                | 0                                |
| 5  | 进水 | 691                  | 87.1                |                                  |                                  |
|    | 出水 | 72                   | 0.2                 | 0                                | 0                                |

3 分析与讨论

3.1 好氧阶段的同步硝化反硝化

SBBR 在好氧阶段不但完全氧化了 NH<sub>3</sub> - N, 同时去除了大量的氮, 显示出了很好的同步硝化反硝化特性, 其中在低曝气量下, 好氧结束时反应器内硝态氮浓度较低, 但反应时间长; 当反应器内溶解氧浓度较高时, 虽减少了反应时间却造成硝态氮浓度较高。

SBBR 采用的生物填料是一种表面粗糙的空间结构环, 有利于微生物的附着, 也使反应器不宜堵塞。生物膜会增加溶解氧向其内部扩散的阻力而形成缺氧区, 另一方面它也有很强的吸附和储碳能力, 在反应初期将部分 COD 吸附、输送到生物膜内部, 用以作为反硝化的碳源。显然, 曝气量的大小对同步硝化反硝化效果有较大影响, 曝气量过大不利于缺氧微环境的形成及对有机碳的吸附和储存。

3.2 缺氧阶段的内碳源反硝化

进入缺氧阶段后, 由于没有外碳源可以利用, 只能以氧化态物质 (氧或硝态氮) 作为电子受体, 通过氧化微生物细胞内的基质和微生物死亡后的残体来

获得能量。内碳源反硝化虽然速率较低, 但无需外加碳源并省却了投加和混合设备, 降低了投资和运行费用。另外, 内碳源反硝化还可以实现污泥减量。

3.3 DO、pH 和 ORP 值的变化有规律

在好氧初始阶段 pH 值会出现快速的增长, 这主要是由于 CO<sub>2</sub> 被从系统中吹脱出或好氧降解了污水中的有机酸所致。接下来的 pH 值降低主要是硝化产 H<sup>+</sup> 的反映, 而出现的低谷恰好与 NH<sub>3</sub> - N 转化为 NO<sub>2</sub><sup>-</sup> - N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 的终点相吻合, 故称之为“氮谷”。此时, DO 和 ORP 则分别快速增长而达到最高值。这是因为在供氧量恒定的条件下, 当有机物和 NH<sub>3</sub> - N 被降解完全时供氧量远大于需氧量, 还原态物质的含量基本降低到最小值, 故形成了 DO 和 ORP 值迅速上升而后达到稳定平台的“氮肘”。而 NO<sub>2</sub><sup>-</sup> - N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 将成为下一阶段缺氧反应的电子受体, 所以这个点能非常有效地表征硝化阶段的结束。

在缺氧阶段的初期 pH 值有一个较大幅度的下降, 这主要是由于积聚的 CO<sub>2</sub> 与剩下的溶解氧反应生成碳酸所致。接下来的 pH 值快速上升是由于反硝化产生碱度和缺氧吸磷消耗 H<sup>+</sup> 所引起的。在反硝化结束即 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 完全转化为氮气或消失时, pH 值出现了持续上升后的突然降低, 这是厌氧状态下部分兼性异养菌发酵产酸的结果, 即出现了“硝酸盐峰”。反硝化初期, 因溶解氧的迅速被消耗而造成 ORP 值的快速下降; 而后由于硝态氮的减少, ORP 也缓慢减小, 当硝态氮耗尽并进入厌氧产酸阶段时 ORP 值又迅速下降, 即出现了“硝酸盐膝”。

以 DO 作为曝气量控制参数

虽然进水水质有所变化, 但根据反应器中的 DO 值来控制曝气量可有选择地控制同步硝化反硝化的效果, 即好氧时间和剩余硝态氮浓度。从运行

能耗考虑, SBBR的能耗主要为曝气,曝气量小则能耗低,所需好氧反应时间长,但剩余的硝态氮浓度低、缺氧反应时间短,反之亦然。因此,总的技术经济比较对于不同情况将会有很大的不同。

pH和 ORP值作为反应终点控制参数

根据 pH和 ORP值的变化规律及其与生物脱氮过程的相关性,可利用一些特征点来判断和控制 SBBR中好氧和缺氧过程的各个步骤:好氧时,以 ORP的“氨肘”和 pH值的“氨谷”指示硝化结束;缺氧时,以 ORP的“硝酸盐膝”和 pH值的“硝酸盐峰”指示反硝化结束。

从试验结果分析, ORP的“氨肘”和 pH值的“硝酸盐峰”常常不明显或不易判断,而 pH值的“氨谷”和 ORP的“硝酸盐膝”则变化明显(具有突变性),非常有利于快速识别和判断,可大大减小控制的滞后性。因此,将 pH值的“氨谷”和 ORP的“硝酸盐膝”作为主控制特征点,将 ORP的“氨肘”和 pH值的“硝酸盐峰”作为参考或辅助控制特征点,这样就实现了多参数控制,增加了控制的可靠性。

#### 4 结论

应用 SBBR处理生活污水时可获得很好的脱氮效果。在好氧阶段, SBBR 能实现同步硝化反硝化;在缺氧阶段,无需投加碳源,利用内碳源便可实现剩余硝态氮的反硝化。

反应器中溶解氧浓度的大小直接影响到好氧时间、好氧剩余硝态氮浓度和缺氧反应时间。

DO、pH和 ORP值的变化具有规律性,反映了污水生物脱氮过程中耗氧和供氧、产酸和产碱、氧化和还原过程的变化。

为准确判断好氧和缺氧反应过程的终点并减少控制的滞后时间,可将 pH值的“氨谷”和 ORP的“硝酸盐膝”作为主控制特征点,而将 ORP的“氨肘”和 pH值的“硝酸盐峰”作为参考或辅助控制特征点。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Wilderer A P, Irvine L R, Goronszy M C. Sequencing Batch Reactor Technology[M]. London: WA Publishing, 2001.
- [ 2 ] Woolard R. The advantages of periodically operated biofilm reactors for the treatment of highly variable

wastewater[J]. Wat Sci Tech, 1997, 35 (1): 199 - 206

- [ 3 ] Sen P, Dentel S K. Simultaneous nitrification-denitrification in a fluidized bed reactor[J]. Wat Sci Tech, 1998, 38 (1): 247 - 254
- [ 4 ] Puznava N, Payraudeau M, Thomberg D. Simultaneous nitrification and denitrification in biofilters with real time aeration control[J]. Wat Sci Tech, 2000, 43 (1): 269 - 276
- [ 5 ] Pochana K, Keller J. Study of factors affecting simultaneous nitrification and denitrification[J]. Wat Sci Tech, 1999, 39 (6): 61 - 68
- [ 6 ] Bryan E H. Research needs for developing innovative water and wastewater treatment technologies[J]. Wat Sci Tech, 2000, 42 (12): 61 - 64
- [ 7 ] Ra C S, Lo K V, Mavinic D S. Control of a swine manure treatment process using a specific feature of oxidation-reduction potential[J]. Bioresource Technology, 1999, 70: 117 - 127.
- [ 8 ] Yu R F, Liaw S L, Cheng W Y, *et al*. Performance enhancement of SBR applying real-time control[J]. Journal of Environmental Engineering, 2000, 126 (8): 943 - 948
- [ 9 ] Chen K C, Chen C Y, Peng J W, *et al*. Real-time control of an immobilized-cell reactor for wastewater treatment using ORP[J]. Wat Res, 2002, 36 (2): 230 - 238
- [ 10 ] Chapentier J, Martin G, Wacheux H, *et al*. ORP regulation and activated sludge: 15 years of experience[J]. Wat Sci Tech, 1998, 38 (3): 197 - 208
- [ 11 ] Paul E, Plisson S S, Mauret M, *et al*. Process state evaluation of alternative oxic-anoxic activated sludge using ORP, pH and DO[J]. Wat Sci Tech, 1998, 38 (3): 299 - 306
- [ 12 ] Li T W, Peng Y Z, Wang Y Y, *et al*. Experimental study on sequencing batch biofilm reactor with biological filtration (SBBR - BF) for wastewater treatment[J]. Wat Sci Tech, 2003, 48 (11 - 12): 299 - 307.

作者简介:李军(1969 - ), 男, 江西遂川人, 副教授、博士后, 主要从事污水生物处理研究。

E - mail: tanweilijun@yahoo.com.cn

收稿日期: 2005 - 12 - 07