

SBR 工艺脱氮除磷研究进展

赵耘挚, 刘振鸿

(东华大学 环境科学与工程学院, 上海 200051)

摘要: 概述了 SBR 脱氮工艺中的同步硝化/反硝化、亚硝化脱氮现象, 讨论了影响 SBR 除磷的碳源、聚磷菌与非聚磷菌竞争、pH 值、好氧曝气、污泥龄、水力停留时间等因素, 并对 SBR 工艺中脱氮与除磷之间的相互影响进行了探讨, 最后给出了可以同时脱氮除磷的一种 SBR 运行方式。

关键词: SBR; 脱氮除磷; 强化生物除磷

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2003)03-0033-04

1 对 SBR 工艺脱氮的研究

传统的脱氮理论认为, 硝化与反硝化反应不能同时发生, 硝化反应需在好氧条件下进行, 而反硝化反应在缺氧条件下完成, SBR 工艺的序批式运行为此创造了良好的环境; 但是, 最近几年国内外有不少研究表明 SBR 系统中存在同步硝化反硝化现象。

李锋等人^[1]认为, 反应器内同步进行硝化反硝化的必要条件是好氧和缺氧环境同时存在, 所以应该控制 DO 为 0.5~1.5 mg/L (随反应器类型和反应条件不同而不同), 在反应器中形成厌氧(缺氧)和好氧并存的环境, 可以实现同步硝化反硝化过程。

Hong W Zhao、Lesley 等人^[2,3]的研究证明, 许多异养微生物能够对有机及无机含氮化合物进行硝化作用, 与自养型硝化菌相比, 异养硝化菌生长快、产量高、需要的基质浓度低, 能忍受酸性更强的环境; 他们发现, 在很多条件下可以同时存在异养和自养型硝化菌, 当 $BOD_5/N > 6.9$ 时异养硝化菌对氨的氧化会起很大的作用。李丛娜等人^[4]在控制 SBR 反应器保持良好的好氧状态 ($DO > 8$ mg/L)、MLSS 较低的情况下, 发现在每一工作周期的前期, 硝化反应的进行使氨氮比较彻底地转化为硝酸盐氮, 在氨氮浓度逐渐降低的同时总氮浓度也逐渐降低。由此得出结论: 在这一阶段既发生了好氧硝化又发生了好氧反硝化, 从而获得了比较可观的总氮去除率, 并推断活性污泥絮体中同时存在着异养硝化菌与好氧反硝化菌。

此外, 还有学者提出了亚硝酸型生物脱氮技

术^[5,6], 认为该技术具有降低能耗、节省碳源、减少污泥生成量、反应器容积小及占地面积省等优点; 这种技术的核心是将硝化过程控制在亚硝酸阶段, 随后进行反硝化。当废水中氨氮浓度较高、pH 值为 7.4~8.3、溶解氧不足时易形成亚硝酸型硝化; 另外氨氮负荷过高时, 在系统运行初期有利于繁殖较快的亚硝酸菌的增长, 使亚硝酸产量大于氧化量而出现积累。Sung - Keun Rhee 等人^[7]利用 SBR 反应器处理合成废水, 其结果表明: 当系统中氨氮的浓度成为限制硝化细菌将亚硝酸盐氮氧化为硝酸盐氮的时候, 自养型硝化菌的活性就受到了抑制, 从而出现了亚硝酸盐的积累(随着曝气时间的增加, 这种积累就会减小); 在后续的缺氧段积累的亚硝酸盐和硝酸盐都能够得到反硝化而被完全去除, 该系统对总氮的去除率为 85% 左右。

2 对 SBR 工艺除磷的研究

强化生物除磷(Enhanced Biological Phosphorus Removal, 简称 EBPR)也是得到广泛注意的技术, 其表现为厌氧状态释放磷的活性污泥在好氧状态下有很强的吸磷能力, 其吸磷量超过了微生物正常生长所需要的磷量, 这是一种高效而经济的除磷技术。一般认为其过程为: ①厌氧段: 聚磷菌(PAOs)吸收废水中的有机物, 将其同化成聚羟基烷酸(PHA), 其所需要的三磷酸腺苷(ATP)及还原能是通过聚磷菌细胞内贮存的聚磷和糖原的降解来提供的, 这个过程会导致反应器中磷酸盐的增加; ②好氧段: 聚磷菌利用 PHA 氧化代谢产生的能量来合成细胞、吸收

反应器中的磷来合成聚磷,同时利用 PHA 合成糖原。可见,在聚磷菌的新陈代谢过程中,三种胞内贮存物(PHA、聚磷、糖原)起到了必不可少的作用。

EBPR 技术的关键在于厌氧区的选择,可以说厌氧区是聚磷菌的“生物选择器”,在厌氧段合成的 PHA 量对于好氧段磷的去除具有决定性意义。一般而言,合成的 PHA 越多则释放的磷越多,好氧段就能吸收更多的磷。但是,控制良好的 SBR 反应器也会发生 EBPR 失效的现象,研究表明主要存在以下影响因素:

2.1 碳源

研究表明,要实现 EBPR 的处理效果,需要系统中 $COD/P \geq 35$ 、 $BOD/P \geq 20$ 。如果原水中短链脂肪酸(VFAs)的含量较高,则有利于 EBPR 的发生并提高 EBPR 的效果;厌氧段废水中 VFAs 的含量应当大于 25 mg/L,但是当 VFAs 含量 > 400 mg/L 时也会导致 EBPR 的失效;同时,碳源的不同可以导致释磷速率及 PHA 合成种类的不同。

2.2 聚磷菌与非聚磷菌的竞争

一般认为,由于一些非聚磷菌也能够厌氧吸收有机物而不用同时水解聚磷,从而形成了对聚磷菌的竞争反应,但是对竞争的引发原因却没有一致的解释。Liu 等人^[8]认为,如果用葡萄糖作外碳源,容易引发聚糖菌(GAOs)与聚磷菌的竞争,但是 Che Ok Jeon 等人^[9]的研究表明,SBR 系统中用乙酸盐、葡萄糖或两者组合作为碳源,也能够达到 EBPR 的效果,而没有产生聚糖菌的增殖。Satoh 等人^[10]的理论认为,如果好氧段进水中的氨基酸或蛋白质含量过低,聚磷菌的生长速率就会减慢,从而导致聚糖菌占优势;如果进水中没有氨基酸,微生物将不得通过三羧酸循环分解无机氮和羧酸来产生氨基酸,其中的羧酸通过聚磷菌分解 PHA 提供,当储存的 PHA 耗尽后,微生物将利用糖原作为原始碳源来提供羧酸,由于聚糖菌分解糖原的酶比聚磷菌的多,从而导致聚糖菌占优势。

2.3 pH 值

聚磷菌在厌氧段时的释磷量一般随 pH 值的升高而增加,而 pH 值是否影响聚磷菌对有机物的吸收仍有矛盾之处。当 $pH < 5$ 时 EBPR 现象不会发生,而 pH 值为 8.5~9.0 则是 EBPR 发生的最佳范围。Che Ok Jeon 等人^[11]试验表明,pH 值对聚磷菌和聚糖菌的竞争也有一定影响,当控制 pH 值为 7.0

(或 8.0)时,聚糖菌在菌群中占优势,从而导致 EBPR 失效;当不控制 pH 值时,由于反硝化的发生和乙酸盐的同化,厌氧段的 pH 值升高到了 8.4,此时完全的 EBPR 是可以发生的,这是由于当 pH 值较高时,吸收乙酸盐需要更多的 ATP,而聚磷菌可以通过聚磷的分解来提供,聚糖菌由于不能提供更多的 ATP 而被淘汰。

2.4 好氧曝气

好氧段曝气量过大或曝气时间过长,会使聚磷菌消耗过多的 PHA 从而影响到对磷的吸收;当处于厌氧段后,虽然聚磷菌能以其最快速率释放磷,但是这些磷在后续的好氧段内却不能再被完全吸收,即过量吸磷受到破坏,EBPR 失效。所以,适当地使聚磷菌保留部分 PHA,可以保持聚磷菌的过量吸磷能力^[12]。

2.5 污泥龄

缩短污泥龄可以排放较多的污泥,从而去除较多的磷,但是会恶化出水水质和增加污泥处理费用;延长污泥龄,由于聚磷菌的衰亡速度较慢,所以可以使聚磷菌在污泥中的数量增加,同样可以使磷的去除量增加。同时,污泥龄的长短会影响到聚磷菌胞内聚合物的含量,所以 EBPR 系统中污泥龄不应太短(一般应大于 3 d)。

2.6 水力停留时间

由于聚磷菌对有机物的吸收在厌氧段内是很快完成的,所以厌氧段内更重要的是污泥龄;适当延长厌氧段的水力停留时间会提高 EBPR 的效果,这可能是因为可以形成更多的 PHA。但是,如果厌氧/好氧水力停留时间的比值过大也会使 EBPR 失效。

3 SBR 脱氮与除磷的相互影响

SBR 工艺中脱氮与除磷之间的关系较为复杂,这主要是因为活性污泥中菌种种群的多样性而造成的,当不同的菌群占优势时,表现的规律不尽相同。

3.1 硝酸盐氮对 EBPR 的影响

由于 EBPR 过程的发生需要完全的厌氧阶段,而厌氧段硝酸盐的存在会破坏生物除磷的效果。这是由于反硝化菌会与聚磷菌竞争废水中的有机基质,而且反硝化菌优先于聚磷菌利用污水中的有机基质进行反硝化,从而在真正厌氧状态形成之间形成了一个兼性的状态。一般而言,生活污水中的硝酸盐氮为 2~5 mg/L,所以不会导致生物除磷的失效,但是如果污水中硝酸盐的浓度很高就可能

反硝化菌与聚磷菌对有机基质的竞争反应而导致生物除磷的失效。这种状态下,需要有足够的和特殊的有机基质以进行反硝化和完成聚磷菌对 PHA 的贮存。

Chang C H 等人^[13]的研究发现,如果 SBR 排水中的硝酸盐浓度从 10.9 mg/L 减少到 5.6 mg/L 时,磷的去除率可以从 80% 提高到 98%。Rusten 等人^[14]发现,当为了达到较好的硝化效果而延长曝气时间,使排水中的硝酸盐浓度 > 10 mg/L 时,生物除磷的能力将由于废水的不完全反硝化而逐渐消失。Pitman 等人的研究证明,如果回流污泥中硝酸盐的浓度 < 5 mg/L,微生物很容易取得良好的释磷效果,但是当硝酸盐的浓度 ≥ 10 mg/L 时,磷的释放就受到抑制从而导致生物除磷的失败。Furumai 等人^[15]认为,当 SBR 系统处于稳定的有机负荷和高效硝化状态下时,为了保持厌氧阶段的高效生物释磷,需要系统中存在的硝酸盐氮能够在混合阶段就发生反硝化而去除。

尽管生物除磷的效果取决于操作方式,但是最重要的限制因子还是进水的 COD 值。一般认为,要达到良好的脱氮除磷效果,废水的 COD/TKN 值应大于 9。Tam 等人^[16]的研究认为,当进水的有机基质主要为易生物降解成分时,反硝化和生物释磷可以同时发生,然而当以难生物降解组分为主时,生物释磷是在反硝化之后发生的。Ruya 等人^[17]对 SBR 工艺的研究证明,废水中的总 COD 值并不是可以反映污水中脱氮除磷所需碳源的有效参数,而 COD 中的易生物降解 COD 值才是可以评价系统功能的主要参数;他们还观察到,在非曝气阶段去除的 COD 值比从利用脱氮、释磷反应计量关系式中计算出的 COD 去除值要高,这说明在厌氧状态下可能存在非聚磷菌对有机碳源储存的竞争反应,这与 ASM3 中假设的生物贮存—水解的理论是相符合的。

3.2 可脱氮聚磷菌(DPAOs)对系统的影响

因为系统中的硝酸盐氮对 EBPR 有不利影响,所以最初认为能发生 EBPR 反应的细菌不能够进行反硝化反应,但是现在有很多研究表明,聚磷菌中至少有一部分能够在缺氧条件下利用硝酸盐为氧供体进行吸磷而发生反硝化反应^[18],所以好氧段只需进行到硝化阶段即可,反硝化及吸磷可以在后续的兼性阶段完成,这种情况下可以节省能耗和避免厌氧

段反硝化菌对碳源的竞争,污泥产量和 SVI 值都会减小^[19],但是缺氧条件下的吸磷速率较为缓慢。

3.3 亚硝酸盐氮的影响

Meinhold 等人^[20]对 SBR 反应器的研究表明,兼性状态下存在的亚硝酸盐氮对可脱氮聚磷菌的整体效果存在影响,当亚硝酸盐氮的浓度为 4~5 mg/L 时,这种影响不是很明显,亚硝酸盐氮甚至可以作为电子供体为可脱氮聚磷菌吸磷时使用,但是亚硝酸盐氮浓度再高就会产生抑制作用。他们的研究表明,亚硝酸盐氮的限制浓度为 5~8 mg/L,当然这和污泥状况有关。

4 SBR 同时脱氮除磷运行方式的选择

SBR 工艺脱氮和除磷的反应条件有相同之处,也有不同之处,有相互的不利影响,也有互促互生的方面,当选择彼此适宜的条件后,是可以达到同时脱氮除磷的效果的。

对于需要同时脱氮除磷的场合,SBR 反应器可采用图 1 所示流程。

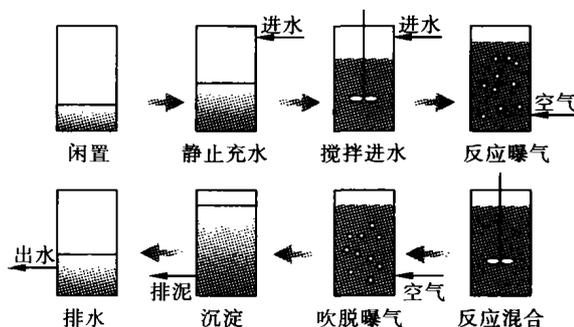


图 1 同时脱氮除磷的 SBR 运行方式

静止进水可以使进水阶段结束后在反应器中形成较高的基质浓度梯度,节省能耗;搅拌进水可以使反应器保持厌氧状态,保证磷的释放;曝气后的反应混合可以进行反硝化反应;随后的曝气可以吹脱污泥释放的氮气,保证沉淀效果,避免磷过早释放;为了防止沉淀阶段发生磷的提前释放问题,让排泥和沉淀同时进行^[21]。

参考文献:

- [1] 李锋,朱南文,李树平,等. 有氧条件同时硝化/反硝化的反应动力学模式[J]. 中国给水排水, 1999, 15(6): 58-60.
- [2] Hong W Zhao, Donald S Mavinic, William K Oldham. Controlling factors for simultaneous nitrification and den-

- trification in a two - stage intermittent aeration process treating domestic sewage [J]. *Wat Res*, 1999, 33(4): 971 - 978.
- [3] Lesley A Robertson. Simultaneous nitrification and denitrification in aerobic chemostat cultures of thiosphaera pantotropha[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1998, 54(11): 2812 - 2818.
- [4] 李丛娜, 吕锡武, 稻森悠平. 同步硝化反硝化脱氮研究[J]. *给水排水*, 2001, 27(1): 22 - 24.
- [5] 施永生. 亚硝酸型生物脱氮技术[J]. *给水排水*, 2000, 26(11): 21 - 23.
- [6] 唐光临, 孙国新, 徐楚韶. 亚硝化反硝化生物脱氮[J]. *工业水处理*, 2001, 21(11): 11 - 13.
- [7] Sung-Keun Rhee, Jay J Lee, Sung-Taik Lee. Nitrite accumulation in a sequencing batch reactor during the aerobic phase of biological nitrogen removal [J]. *Biotechnology Letters*, 1997, 19(2): 195 - 198.
- [8] Liu W T, Mino T, Nakamura K, *et al*. Role of glycogen in acetate uptake and polyhydroxyalkanoate synthesis in anaerobic - aerobic activated sludge with a minimized polyphosphate content[J]. *Ferment Bioeng*, 1994, 77(5): 535 - 539.
- [9] Che Ok Jeon, Dae Sung Lee, Jong Moon Park. Enhanced biological phosphorus removal in an anaerobic - aerobic sequencing batch reactor: characteristics of carbon metabolism[J]. *Water Environment Research*, 2001, 73(3): 295 - 300.
- [10] Satoh H, Mino T, Matsuo T. Deterioration of enhanced biological phosphorus by the domination of micro - organisms without polyphosphate accumulation[J]. *Wat Sci Tech*, 1994, 30(6): 203 - 211.
- [11] Che Ok Jeon, Dae Sung Lee, Jong Moon Park. Enhanced biological phosphorus removal in an anaerobic - aerobic sequencing batch reactor; effect of pH[J]. *Water Environment Research*, 2001, 73(3): 301 - 306.
- [12] C Y Dassanayaka, R L Irvine. An enhanced biological phosphorus removal (EBPR) control strategy for sequencing batch reactor(SBRs)[J]. *Wat Sci Tech*, 2001, 43(3): 183 - 189.
- [13] Chang C H, Hao O J. Sequencing batch reactor system for nutrient removal: ORP and pH profiles[J]. *J Chem Tech Biotechnol*, 1996, 67: 27 - 38.
- [14] Rusten B, Eliassen H. Sequencing batch reactors for nutrient removal at small wastewater treatment plants[J]. *Wat Sci Tech*, 1993, 28(10): 233 - 247.
- [15] Furumai H, Kazmi A A, Furuya Y, *et al*. Effect of sludge retention time(SRT) on nutrient removal in sequencing batch reactor[J]. *Journal of Environmental Science and Health part A*, 1999, 34(2): 317 - 328.
- [16] Tam N F Y, Worng Y S, Leung G. Effect of exogenous carbon sources on removal of inorganic nutrient by the nitrification - denitrification process[J]. *Wat Res*, 1992, 26(9): 1229 - 1236.
- [17] Ruya Tasli, Derin Orhon, Nazik Artan. The effect of substrate composition on the nutrient removal potential of sequencing batch reactors[J]. *Water SA*, 1999, 25(3): 337 - 344.
- [18] 周康群, 杜林, 黄小丹. 缺氧条件下聚磷菌利用硝酸盐吸磷的研究[J]. *上海环境科学*, 2001, 20(11): 556 - 557.
- [19] Kuba T, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Phosphorus and nitrogen removal with minimal COD requirement by integration of denitrifying dephosphatation and nitrification in a two - sludge system[J]. *Wat Res*, 1996, 30(7): 1702 - 1710.
- [20] Meinhold J, Arnold E, Isaacs S. Effect of nitrite on anoxic phosphate uptake in biological phosphorus removal activated sludge[J]. *Wat Res*, 1999, 33(8): 1871 - 1883.
- [21] 沈耀良, 赵丹. 强化 SBR 工艺脱氮除磷效果的若干对策[J]. *中国给水排水*, 2000, 16(7): 23 - 25.

电话: (021)62374815

E-mail: zhaoyunzhi@citiz.net

收稿日期: 2002 - 09 - 08

创建节水型城市, 实施可持续发展