

低碳氮比城市污水短程生物脱氮试验研究

邱兆富¹, 周琪², 杨殿海², 江建权³

(1. 华东理工大学资源与环境工程学院, 上海 200237; 2. 同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092; 3. 天津市政工程设计研究院, 天津 300051)

[摘要] 在常温下对低碳氮比城市污水进行了短程生物脱氮中试研究。当进水 COD 为 130~210 mg/L, $m(\text{COD})/m(\text{TN})$ 为 3.2~4.5、水温 19~23 ℃ 时, 通过控制低氧曝气区的 DO 为 0.2~0.6 mg/L, 在低氧—好氧(LO)和缺氧—低氧—好氧(ALO)两种工艺中均实现了短程硝化反硝化过程。当 HRT 为 8 h、污泥回流比和内回流比分别为 1 和 2、MLVSS 为 1 900 mg/L 时, LO、ALO 工艺的 TN 去除率分别达到 64%和 74%。

[关键词] 城市污水; 低溶解氧; 短程硝化反硝化

[中图分类号] X703.1 [文献标识码] B [文章编号] 1005-829X(2006)11-0035-04

Short-cut nitrification and denitrification of low C/N ratio municipal wastewater in a pilot-scale research

Qiu Zhaofu¹, Zhou Qi², Yang Dianhai², Jiang Jianquan³

(1. College of Resource and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. State Key Lab for Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Tianjin Municipal Engineering Design and Research Institute, Tianjin 300051, China)

Abstract: A pilot-scale biological research has been made for study on short-cut nitrification and denitrification of low $m(\text{COD})/m(\text{TN})$ ratio municipal wastewater under normal temperature. When the influent COD is 130-210 mg/L, $m(\text{COD})/m(\text{TN})$ ratio is 3.2-4.5, and the water temperature is 19-23 ℃, by controlling dissolved oxygen in the main aeration tank between 0.2-0.6 mg/L short-cut nitrification and denitrification has been achieved in low levels of oxygen-oxic(LO) and anoxic-low levels of oxygen-oxic(ALO) processes. Therefore, as the HRT is 8 h, backflow activated sludge ratio is 1.0, mixed liquid recycle ratio is 2.0, and MLVSS is 1 900 mg/L, TN removal rates of LO and ALO process are up to 64% and 74% respectively.

Key words: municipal wastewater; low levels of dissolved oxygen; short-cut nitrification and denitrification

我国南方许多城市污水厂的进水 BOD_5 常在 100 mg/L 以下^[1], 而氮、磷含量相对较高。采用传统的硝化反硝化工艺处理这种低碳氮比城市污水时, 因碳源不足, 脱氮效率较低。国内外研究表明, 与传统的硝化反硝化相比, 短程硝化反硝化可节省 40% 的有机碳源^[2]和 25% 的空气量^[3]。通过维持较低浓度的溶解氧(DO)所获得的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累是稳定和

持久的^[4]。K. Hanaki 等^[5]研究表明, 当 DO 质量浓度为 0.5 mg/L 时, 亚硝酸细菌会成倍增长, 从而弥补了因低氧造成的比基质利用率的降低, 使整个硝化过程中 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 的氧化未受到明显的影响; 但硝酸细菌没有增长, 造成 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的积累。

通过控制 DO 浓度, 笔者就常温下低碳氮比城市污水的短程硝化反硝化生物脱氮工艺的可行性进

[基金项目] 国家高技术研究发展计划(863)项目(2002AA601023)



改性[J]. 江苏环境科技, 2003, 16(4): 1-3.

[3] 国家环保总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1997: 163.

[作者简介] 羊依金(1965—), 1990年毕业于昆明理工大学, 硕士, 副教授, E-mail: jinyiyang@163.com, 电话: 13688409811.

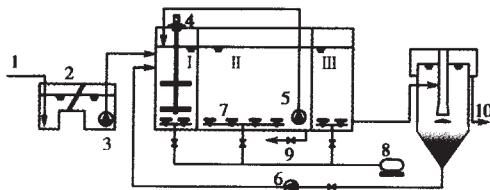
[收稿日期] 2006-06-15(修改稿)

行了实验与探讨。

1 材料与方法

1.1 试验装置

中试试验系统由进水池、生物反应器和二沉池三部分组成,如图1所示。生物反应器分为I、II、III三个区,体积分别为7.92、24.90、4.62 m³。二沉池为竖流式圆形沉淀池,直径2.85 m,有效水深2.0 m,设计停留时间2.5 h。



1—泵站来水;2—细格网;3—进水泵;4—搅拌机;5—内回流泵;6—污泥回流泵;7—微孔曝气盘;8—鼓风机;9—排泥阀;10—出水

图1 中试系统流程

1.2 试验用水

试验污水取自武汉经济技术开发区汉庆街污水泵站集水井。进入该泵站的污水为合流污水,试验期间为秋季,降雨较少,进水水质比较稳定,如表1所示。

1.3 分析项目和方法

pH、DO的测定采用德国WTW公司生产的pH330i型pH计和Oxi330i型DO测定仪。其他分析测试项目及方法见文献[6]。

2 污泥驯化

驯化前,生物反应器按AO脱氮工艺运转,I区为缺氧区,II、III两区为好氧区,运行参数及处理效果分别参见表2和表3。该工艺的NH₃-N和TN去除率分别为55%、36%,表明该系统内存在一定数量的硝化细菌与反硝化细菌,具备驯化的微生物条件。

开始驯化时,I区只曝气而不搅拌。根据K. Hanaki等^[5]的研究结果,DO质量浓度为0.5 mg/L

表1 原水水质

指标	pH	COD/(mg·L ⁻¹)	SS/(mg·L ⁻¹)	NH ₃ -N/(mg·L ⁻¹)	NO ₂ ⁻ -N/(mg·L ⁻¹)	NO ₃ ⁻ -N/(mg·L ⁻¹)	TN/(mg·L ⁻¹)	TP/(mg·L ⁻¹)
范围	7.46~7.86	48~266	19~456	10.6~45.4	0~0.39	0.19~1.84	15.7~53.7	1.1~6.4
均值	7.53	158	58	35.2	0.03	0.75	41.5	3.8

时,硝酸细菌的活性受到明显抑制。同时,考虑到DO<0.2 mg/L时,硝化基本不发生^[7]。由此,驯化时控制I、II区的DO质量浓度在0.2~0.6 mg/L。除内回流比调整为2外,其他运行参数不变。III区为后曝气区,DO质量浓度控制在2.0 mg/L以上,目的是:提高出水DO水平,避免污泥在二沉池内产生上浮;降低出水NH₃-N和NO₂⁻-N浓度;改善污泥沉降性能。

污泥驯化期间三态氮(NH₃-N、NO₂⁻-N及NO₃⁻-N)

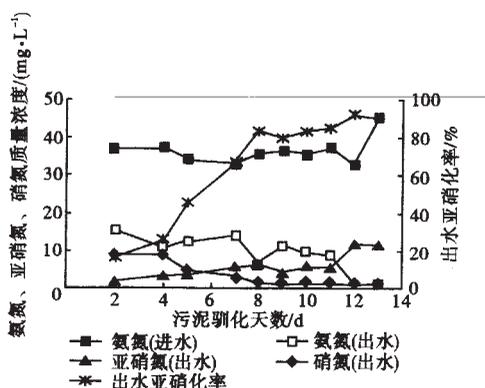


图2 污泥驯化时三态氮的变化情况

的变化情况如图2所示。驯化进行到第7天,出水亚硝化率(NO₂⁻-N占NO₃⁻-N与NO₂⁻-N的质量分数)达60%以上,并逐日增加,驯化到第12天,达到90%以上。短程硝化的标志是稳定且较高的NO₂⁻-N积累,亚硝化率在50%以上^[8]。至此,可以认为已具备了短程硝化反硝化工艺研究的条件,驯化结束。

3 试验结果与讨论

污泥驯化完成后,重点考察了两种工艺的运行情况:工艺一的I、II区为低氧区,III区为好氧区,简称为低氧—好氧(LO)工艺。工艺二的I区为缺氧区,II区为低氧区,III区为好氧区,简称为缺氧—低氧—好氧(ALO)工艺。受现场试验条件限制,试验共运行49 d。两种工艺的运行参数及试验结果见表2和表3。

3.1 NO₂⁻-N积累的原因分析

由表3可知,LO、ALO工艺的NH₃-N去除率都超过了98%,出水亚硝化率均在85%以上,说明发生了短程硝化过程。LO与ALO工艺沿程各取样点三态氮的变化如图3所示,TN及COD的变化如图4所示。由图3及图4可知,在LO工艺的I区,

表 2 工艺条件

工艺条件	AOI 艺	LOI 艺	ALO 艺
水温 /	23~25	21~23	19~23
进水量 / (m ³ ·h ⁻¹)	4.62	4.65	4.74
HRT/h	8	8	8
污泥回流比	1.0	1.0	1.0
内回流比	1.5	2.0	2.0
MLVSS / (mg·L ⁻¹)	1 482	1 860	1 876
SVI / (mL·g ⁻¹)	110.6	215.5	206.9
进水 m(COD) m(TN)	4.1	3.9	3.6
系统泥龄 /d	16.2	17.6	23.5
DO / (mg·L ⁻¹)	0.1~0.2	0.2~0.4	< 0.1
	0.2~3.0	0.2~0.5	0.1~0.5
	2.6~4.1	2.4~4.0	3.4~5.7

表 3 试验工艺的运行结果

工艺条件	AOI 艺	LOI 艺	ALO 艺
进水 / (mg·L ⁻¹)	157.53	173.84	148.38
COD 出水 / (mg·L ⁻¹)	21.71	40.39	29.89
去除率 / %	86.20	76.80	79.90
进水 / (mg·L ⁻¹)	35.37	40.15	34.10
NH ₃ -N 出水 / (mg·L ⁻¹)	15.87	0.41	0.63
去除率 / %	55.10	99.0	98.10
进水 / (mg·L ⁻¹)	37.97	44.32	41.20
TN 出水 / (mg·L ⁻¹)	24.22	15.82	10.80
去除率 / %	36.20	64.30	73.80
进水 / (mg·L ⁻¹)	3.47	4.24	4.01
TP 出水 / (mg·L ⁻¹)	2.42	3.88	2.73
去除率 / %	30.30	8.50	32.0
进水 / (mg·L ⁻¹)	0	0.02	0.02
NO ₂ ⁻ -N 出水 / (mg·L ⁻¹)	1.43	13.96	7.91
进水 / (mg·L ⁻¹)	0.53	0.71	0.77
NO ₃ ⁻ -N 出水 / (mg·L ⁻¹)	7.71	1.13	1.23
出水亚硝化率 / %	15.6	92.5	86.5

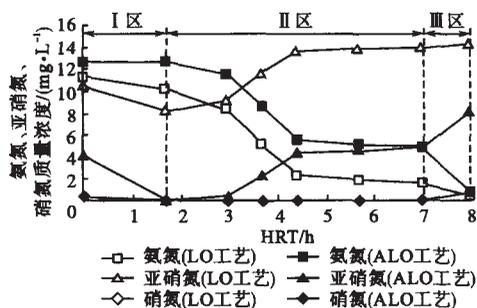


图 3 生物反应器内三态氮的沿程变化

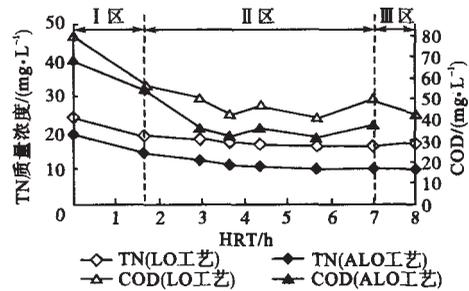


图 4 生物反应器内 TN 和 COD 的沿程变化

因碳源相对充足,反硝化作用使 NO₂⁻-N 浓度降低,而在 I 区的前端,由于碳源浓度降低,使得 NO₂⁻-N 的产生速率大于反硝化速率,NO₂⁻-N 浓度开始大幅上升。与之相似,在 ALO 工艺的 II 区也出现了 NO₂⁻-N 积累的现象。从图 4 可知,在两种工艺的 III 区末端反硝化作用已很微弱,可以认为 NO₃⁻-N 被反硝化为 NO₂⁻-N 的部分很小,若硝酸细菌的活性未被抑制,则应有部分 NO₂⁻-N 被氧化为 NO₃⁻-N。但从图 3 可知,III 区内 NO₃⁻-N 质量浓度均低于 0.1 mg/L。可见,造成 NO₂⁻-N 积累的主要原因:低氧区的 DO 质量浓度 0.2~0.6 mg/L,使硝酸细菌的活性受到抑制;低氧区碳源不足,无法将产生的 NO₂⁻-N 反硝化去除。其中硝酸细菌的活性受到抑制也可从 III 区 NO₃⁻-N 浓度升高得到验证。在 III 区,由于 DO 质量浓度超过 2 mg/L,硝酸细菌活性有所恢复,在 1 h 内使 NO₃⁻-N 质量浓度增加 0.5 mg/L 以上。

3.2 设置缺氧区的必要性

与传统的生物脱氮工艺不同,该试验的内回流泵位于低氧区的末端,当出现 NO₂⁻-N 积累时,在其未被氧化成 NO₃⁻-N 时就被回流至 I 区。在 LO 工艺的低氧区前端,碳源相对充足,回流至此的 NO₂⁻-N 直接被反硝化为 N₂,提高了 TN 去除率。从表 2 可知,虽然 LO 工艺的 TN 去除率较高,但 TP 去除率却不理想。这是因为在分子氧和 NO_x⁻-N 存在的情况下,聚磷菌的释磷受到抑制,因而在 I、II 区缺乏过量吸磷的动力,如图 5 所示,沿程 PO₄³⁻-P 浓度变化不大。另一方面,在 LO 工艺的 III 区,部分易生物降解 COD 首先用于好氧菌的生命活动。同时,在 O₂ 和 NO_x⁻-N 同时存在时,反硝化菌首先利用 O₂ 作为最终电子受体^[9]。若将微生物好氧呼吸消耗的 COD 用于反硝化和磷的释放,有可能提高脱氮与除磷效果。基于此,使 III 区处于缺氧状态,即 ALO 工艺。

从图 3 和图 4 可知, ALO 工艺的缺氧池为反硝化过程创造了良好的环境, 使得易生物降解 COD 优先用于反硝化, 从而节省了部分碳源。试验结果表明, 在 区每消耗 1 mg COD, ALO 工艺可去除 0.37 mg TN, 而 LO 工艺只能去除 0.22 mg TN。另一方面, 在厌氧条件下, 一些复杂的、长链的大分子有机物水解为短链的小分子有机物。缺氧区的存在, 延长了整个系统内厌氧环境存在的时间, 增加了易降解碳源浓度。可见, 在碳源不足时, 设置缺氧区可明显提高 TN 去除率。在相近条件下, ALO 工艺的 TN 去除率比 LO 工艺提高了约 10%。

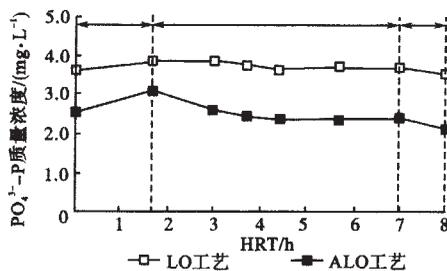


图 5 生物反应器内 PO₄³⁻-P 的沿程变化

在 ALO 工艺的 区, 因碳源充足, 污泥回流和内回流带来的 NO₂⁻-N 被快速反硝化, 区内的 NO₂⁻-N 大幅降低, 有利于聚磷菌的厌氧释磷, 为聚磷菌在缺氧或好氧条件下提供了吸磷动力。如图 5 所示, ALO 工艺的生物除磷效果比 LO 工艺得到较大提高, TP 去除率达到 32%。有关 ALO 工艺低氧区的吸磷机理有待进一步研究。

3.3 有机物的去除

从表 1 和表 2 可以看出, 在反应条件相近的情况下, 与 AO 工艺相比, LO 工艺的出水 COD 浓度升高了近 1 倍, 说明降低 DO 会削弱异养细菌对 COD 的好氧分解速率。但是降低 DO 形成的缺氧反硝化所消耗的 COD 却增加, 两者综合结果使得 LO 工艺的出水 COD 仍然在 50 mg/L 以下。因 ALO 工艺的反硝化效果较 LO 工艺好, 用于反硝化的 COD 要多, 出水 COD 较低。总体上看, 降低反应器 DO 对 COD 的去除效果影响较小。

3.4 污泥沉降性能

正常的活性污泥, SVI 一般在 50~150 mL/g 之间^[10]。从表 1 可知, LO、ALO 工艺的 SVI 均在 200 mL/g 左右, 比驯化前 AO 工艺的 SVI 高出近 1 倍。B. E. Rittmann 等^[11]认为, SVI > 200 mL/g 就意味着发生

污泥膨胀。按此标准, 降低 DO 浓度后的活性污泥均存在轻微的膨胀, 但出水水质并未发生明显改变。

4 结论

(1) 当进水 COD 质量浓度为 130~210 mg/L, m(COD) m(TN) 为 3.2~4.5, 水温 19~23 , 通过控制主曝气区的 DO 质量浓度在 0.2~0.6 mg/L, 在 LO 和 ALO 两种工艺中均实现了短程硝化反硝化过程。当 HRT 为 8 h, 污泥回流比和内回流比分别为 1 和 2, MLVSS 质量浓度为 1 900 mg/L 左右时, LO、ALO 工艺的 TN 去除率分别达到 64% 和 74%。

(2) 对低碳氮比城市污水, 低氧区前设置缺氧区可使易生物降解碳源优先用于反硝化, 在相近的反应条件下, TN 去除率可提高约 10%。

(3) 对低碳氮比城市污水, 降低反应器 DO 对 COD 去除效果的影响较小。降低 DO 浓度后的活性污泥存在轻微膨胀, 但出水水质未发生明显改变。

[参考文献]

- [1] 付志忠, 邹利安. 深圳罗芳污水厂一期工程试运行简评[J]. 给水排水, 2000, 26(1): 6-10.
- [2] Yoo H, Ahn K H, Lee H J, et al. Nitrogen removal from synthetic wastewater by simultaneous nitrification and denitrification (SND) via nitrite in an intermittently-aerated reactor[J]. Wat. Res., 1999, 33(1): 145-154.
- [3] Abeling U, Seyfried C F. Anaerobic-aerobic treatment of high-strength ammonia wastewater-nitrogen removal via nitrite [J]. Wat. Sci. Tech., 1992, 26(5-6): 1 007-1 015.
- [4] 周少奇, 周吉林, 范家明. 同时硝化反硝化生物脱氮技术研究进展[J]. 环境技术, 2002(2): 34-44.
- [5] Hanaki K, Wantawin C, Ohgaki S. Nitrification at low levels of dissolved oxygen with and without organic loading in a suspended-growth reactor[J]. Wat. Res., 1990, 24(3): 297-302.
- [6] 国家环保总局. 水和废水监测分析方法[M]. 第 3 版. 北京: 中国环境科学出版社, 1989: 252-286.
- [7] Bliss P, Barnes D. Modeling nitrification in plant scale activated sludge[J]. Wat. Sci. Tech., 1986, 18(6), 139-148.
- [8] 张蔚萍, 陈建中. 低碳高浓度含氮废水的生物脱氮技术[J]. 环境保护, 2003(6): 20-21.
- [9] 郑兴灿, 李亚新. 污水除磷脱氮技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998: 49-52.
- [10] 高廷耀, 顾国维. 水污染控制工程-下册[M]. 第 2 版. 北京: 高等教育出版社, 1999: 185-187.
- [11] Rittmann B E, McCarty P L. 环境生物技术: 原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 292-294.

[作者简介] 邱兆富(1971—), 2005 年毕业于同济大学, 博士学位, 讲师。电话: 021-64253132, E-mail: qiuzhaofu@126.com.
[收稿日期] 2006-06-23(修改稿)