

# 低碳氮比实际生活污水 A<sup>2</sup>O-BAF 工艺低温脱氮除磷

王建华,陈永志,彭永臻\* (北京工业大学,水质科学与水环境恢复工程重点实验室,北京 100124)

**摘要:** 在低温条件下,采用 A<sup>2</sup>O-BAF 工艺处理低碳氮比实际生活污水.结果表明,该双污泥工艺在平均温度为 14.2℃、平均进水 COD 369.5mg/L、TN 76.8mg/L 即 C/N 为 4.81 的工况下可以实现深度脱氮除磷.平均出水 TN 与 TP 分别为 13.21mg/L 和 0.23mg/L.其中 COD、氨氮、TP 和 TN 的去除率分别为 86.2%、99.8%、96.6%、81.5%,达到国家污水处理一级 A 标准(GB18918-2002).低温下 A<sup>2</sup>O 工艺段活性污泥的平均 SVI 为 85.4mL/g,污泥具有良好的沉降性能.此外试验过程中可以利用 pH 值和氧化还原电位值作为该系统 A<sup>2</sup>O 各反应阶段的控制参数,来间接的指示 A<sup>2</sup>O 各区的反应情况.

**关键词:** 低碳氮比生活污水; A<sup>2</sup>O-BAF 工艺; 脱氮除磷; 低温

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2010)09-1195-06

**Biological nutrients removal from domestic wastewater with low carbon-to-nitrogen ratio in A<sup>2</sup>O-BAF system at low temperature.** WANG Jian-hua, CHEN Yong-zhi, PENG Yong-zhen\* (Key Laboratory of Beijing Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China) *China Environmental Science*, 2010,30(9): 1195~1200

**Abstract:** Operational performance of A<sup>2</sup>O-BAF was investigated when treating domestic wastewater with low carbon-to-nitrogen ratio at low temperature. Under the condition of average temperature of 14.2℃ and carbon-to-nitrogen ratio of 4.81, enhanced nitrogen and phosphorus removal was achieved. Average effluent total nitrogen and total phosphorus concentrations were 13.21mg/L and 0.23mg/L, respectively. The removal efficiencies of COD, ammonium nitrogen, total nitrogen and total phosphorus were 86.2%, 99.8%, 96.6% and 81.5%, respectively. The effluent quality could satisfy the first level A criteria specified in the discharge standard of pollutants for municipal wastewater treatment plant (GB18918-2002). Although the system was operated under low temperature, good settle ability with SVI of 85.4 mL/g was obtained. Moreover, pH and oxidation reduction potential could be used as control parameters for process control of A<sup>2</sup>O-BAF system. It was suggested that the operational state could be well known according to the changes of simple online sensors.

**Key words:** sewage with low carbon-to-nitrogen ratio; A<sup>2</sup>O-BAF system; nitrogen and phosphorus removal; low temperature

影响污水处理的因素有很多,其中温度和碳源是比较重要的因素.我国处理生活污水最主要的工艺就是利用微生物代谢的悬浮活性污泥工艺和生物膜工艺,而每种具有特有处理功能的微生物都有其最适宜生存的温度,绝大多数微生物正常生长的温度是 20~35℃,低温会影响微生物细胞内的酶的活性,在一定温度范围内,温度每升高 10℃,微生物活性将增加 1 倍;而每降低 10℃,微生物活性将降低 1 倍,从而降低了污水的处理效果<sup>[1-2]</sup>.相比温度而言,碳源也是一个非常重要的因素,无论是脱氮还是除磷都需要有易降解的

VFA,碳源不充足,脱氮除磷就难以达到预期的效果<sup>[3-4]</sup>.目前,低碳氮比生活污水在我国很多城市也十分常见<sup>[5]</sup>,而在我国的北方城市冬天的水温一般保持在十几℃,这给污水处理提出了更大的挑战.如何提高低温下低碳氮比生活污水的处理效果成为了当今污水生物处理的一大难题.

收稿日期: 2010-01-05

基金项目: 北京市教委科技创新平台项目;“城市水资源与水环境国家重点实验室”开放基金项目(QAK200802);国家“十一五”重大科技专项课题(2008ZX07317-007-005,2008ZX07209-003)

\* 责任作者, 教授, pyz@bjut.edu.cn

鉴于以上因素本研究针对低碳氮比的实际生活污水,采用 A<sup>2</sup>O-BAF 双污泥系统,实现低温下对低碳氮比生活污水的深度脱氮除磷. 对于

该工艺在常温和低碳氮比条件下的脱氮除磷已有研究<sup>[6]</sup>,但本试验着重于低温条件下的深度脱氮除磷.

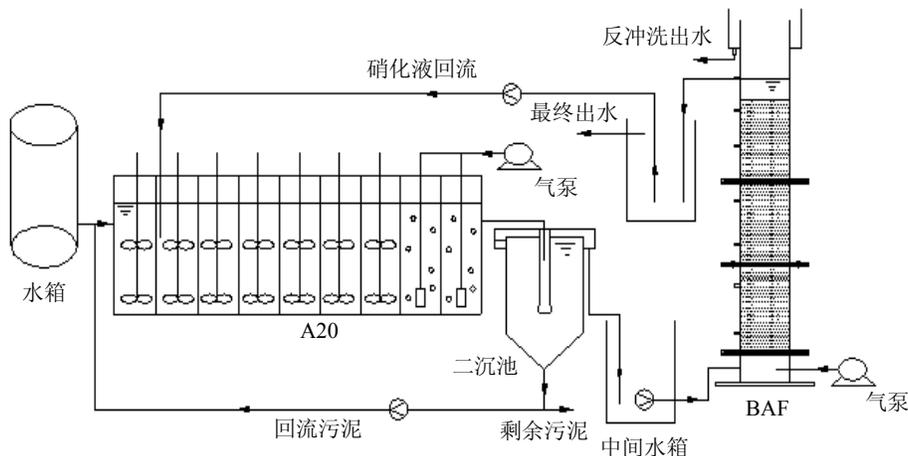


图1 A<sup>2</sup>O-BAF 工艺系统流程

Fig.1 Schematic diagram of A<sup>2</sup>O-BAF system

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置和运行工况

A<sup>2</sup>O-BAF 工艺系统流程见图 1,该工艺采用活性污泥法和生物膜法相结合的双污泥系统,试验装置包括进水水箱、A<sup>2</sup>O 反应器、二沉池、中间水箱、曝气生物滤池和出水水箱.主体反应器都是由有机玻璃制成,其中 A<sup>2</sup>O 由 9 个格室构成,总有效容积是 30.5L,第 1 个格室是厌氧区,随后的 6 个是缺氧区,剩余的 2 个是好氧区,即厌氧区、缺氧区和好氧区的容积比是 1:6:2.A<sup>2</sup>O 的进水平均温度 14.2℃,进水量是 3.8L/h, DO 控制在 1.5mg/L,相应的 HRT 为 8h,MLSS 约为 3500mg/L 左右,SRT 为 15d,硝化液回流 350%,污泥回流 100%,A<sup>2</sup>O 中的污泥取自北京市某污水处理厂的 A<sup>2</sup>O 中试系统,平均污泥体积指数(SVI)为 85.4mL/g 左右,沉降性能良好.二沉池有效容积 21L.BAF 空塔容积 15L,实际 HRT 为 20min.进水量、硝化液回流量、污泥回流量均由蠕动泵控制,曝气生物滤池进水量由高压泵控制.曝气生物滤池是上向流生物滤池以陶粒为填料,其上可以形成良好的生物膜.水箱进水经 A<sup>2</sup>O 系统、二沉池中间水箱进入到生物滤池由重力作用流入到最终水箱,大

部分出水经蠕动泵打入到前端 A<sup>2</sup>O 系统的缺氧段.A<sup>2</sup>O-BAF 双污泥系统解决了传统 A<sup>2</sup>O 工艺脱氮除磷处于同一个反应器中的矛盾,将脱氮和除磷分开在 2 个系统中进行,即将硝化作用主要在曝气生物滤池 BAF 中完成<sup>[7-11]</sup>,可以节省好氧段的停留时间即可以节省曝气量.缺氧段较长主要是强化其的反硝化除磷功能,这样可以在一定程度上弥补碳源不足.试验共进行了 4 个月.

### 1.2 试验用水和测试方法

试验用水取自某学校生活区所排放的实际生活污水,其水质情况见表 2.进水的 COD/TN 仅为 4.81,属于典型的低碳氮比生活污水.

COD:COD 快速测定仪测定;NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N:纳氏试剂光度法测定;NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N:N-(1-萘基)-乙二胺光度法测定;NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N:麝香草酚分光光度法测定;TP:抗坏血酸-钼蓝分光光度法;MLSS:滤纸称重法;T、pH 值和 DO:WTW inolab level 2 在线监测仪.其中样品取自各主要工艺段的出水口.

### 1.3 针对低温系统所做的改进

低温限制了微生物的生长以及酶的活性,温度的下降对活性污泥的吸附性能、沉降性能、微生物生长发育、种群组成及曝气池中氧总转移效率等因素都有负影响<sup>[12-14]</sup>,但低温下污水处理系

统仍具有处理能力.冬季来临时,对于微生物反应器来说,应该做出适宜的改进.为保证在低温下该系统有一定的处理能力,课题组对其做出了一些改进,首先将进水流量由原来的 5.6L/h 降低到了

3.8L/h 相应的水力停留时间由原来的 6h 提高到了 8h.A<sup>2</sup>O 中好氧段曝气量由 1mg/L 增加到了 1.5mg/L.从而通过降低有机负荷增大曝气量来适应温度的变化.

表 1 试验用水

Table 1 Characteristics of influent wastewater

参数	COD(mg/L)	TN(mg/L)	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P(mg/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N(mg/L)	C/N	C/P
范围	249.2~443	72.2~80.7	5.34~6.57	66.3~71.57		
平均值	369.5	76.8	5.8	68.25	4.81	63.7

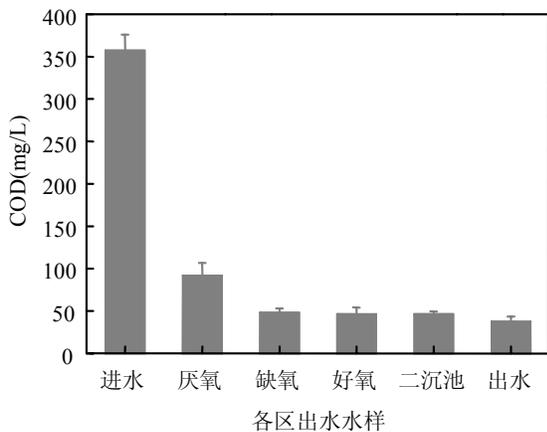


图 2 COD 在 A<sup>2</sup>O-BAF 的变化规律

Fig.2 Evolution of the COD concentration in A<sup>2</sup>O-BAF reactor

好氧段 COD 没有明显的变化,但在 BAF 中有少量的 COD 去除去除率为 2.52%.出水中剩余的有机物都不可降解.

### 2.2 A<sup>2</sup>O-BAF 工艺低温下深度脱氮除磷

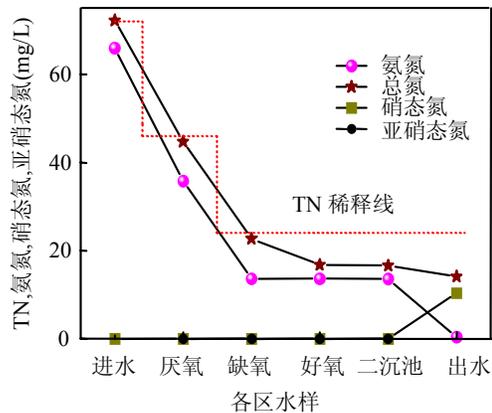


图 3 氮在系统内的转化规律

Fig.3 Evolution of the nitrogen concentration in A<sup>2</sup>O-BAF reactors

## 2 结果与讨论

### 2.1 A<sup>2</sup>O-BAF 工艺低温下 COD 的去除规律

试验期间 COD 的变化规律如图 2 所示,反应器平均的有机负荷为 0.316kgCOD/(kgMLSS·d). COD 的去除率为 86.2%,出水 COD 平均值为 44.6mg/L.对于本工艺,后续的 BAF 承担着硝化作用,而除磷和反硝化都在前段的 A<sup>2</sup>O 中进行,因此 COD 的降解主要在 A<sup>2</sup>O 反应器中.如图可知厌氧段去除了大部分的 COD,其次在缺氧段也有小幅度的下降,这有一部分是由于厌氧段的污泥回流和缺氧段的硝化液回流的稀释作用,另外,厌氧段的 PAOs 的释磷反应消耗了大部分的可生物降解的有机物,同时缺氧段的反硝化作用也消耗了少量剩余的有机物,厌氧段和缺氧段出水的 COD 平均值分别为 91.77mg/L 和 48.08mg/L.

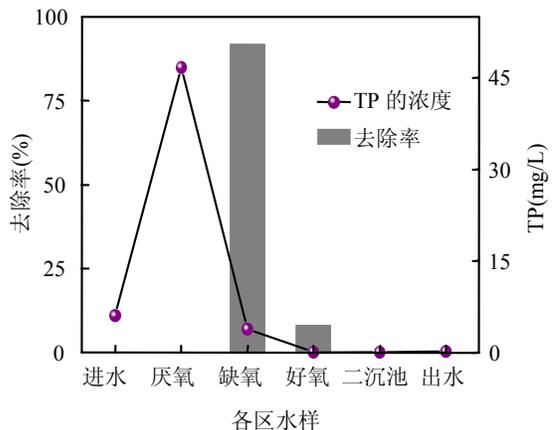


图 4 磷在系统内的转化规律

Fig.4 Evolution of the phosphorus concentration in A<sup>2</sup>O-BAF reactors

氮在系统中的转化规律如图 3 所示由于厌氧区和缺氧区的稀释作用使得 A<sup>2</sup>O 缺氧出水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的浓度下降到 14.6mg/L, A<sup>2</sup>O 好氧段没有 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的减少, 而此阶段 A<sup>2</sup>O 中的 SRT 为 15d, 在启动阶段通过 9d 的 SRT 成功的淘洗硝化细菌, 约 5 个污泥龄(45d)成功启动 A<sup>2</sup>O. 当将 SRT 提高到 15d 后, 也没有在好氧段出现明显的硝化作用, 这说明此条件下 A<sup>2</sup>O 系统运行已稳定, 而剩余的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 都是通过 BAF 中生物膜的硝化作用实现“真正意义”上的去除. 值得注意的是 BAF 进水 TN 的量高于出水 TN 的量, 差值为 3.72mg/L, 说明 BAF 中有可能发生了 SND 现象.

低温对 BAF 的硝化作用几乎没有影响, 由于前期 BAF 中生物膜已经生长成熟, 生物膜上的生物量较高, BAF 中各项都已经稳定, 即使温度偏低, 也只不过是生物膜脱落以及生产量变慢, 但是仍然可以达到平衡. 这期间在 BAF 的柱子内壁上也生长了大量的生物膜, 这样在某种程度上可以有效的密闭生物膜中的生物活性降低的负效应. 在 BAF 停留时间仅 20min, 并且水温只有 14.2℃ 的情况下, BAF 中硝化率达到 99.8%, 表现出生物膜硝化作用的稳定性及高效性. 出水 TN 浓度 14.11mg/L, 符合国家一级 A 排放标准, 出水 TN 大多是 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, 其值为 10.39mg/L.

从图 4 可见厌氧区停留时间在不到 1h 的工况下释磷量达到了 46.73mg/L, 厌氧释磷速度 45.43mg/(L·h), 聚磷菌在低温下的活性很高. 进水磷的浓度为 6.04mg/L, 缺氧段缺氧吸磷使得磷的浓度下降到 3.85mg/L, 缺氧吸磷速度 5.25mg/(L·h). 经过好氧段进一步吸磷后磷的浓度下降到了 0.18mg/L, BAF 出水磷的浓度是 0.19mg/L. 缺氧吸磷率为 91%, 磷的吸收/磷的释放=1.15. 由此可以解决由于碳源不足而引起的脱氮与除磷之间的矛盾. 这样正符合此工艺的特点—好氧段的作用就是对缺氧段没有去除完的磷进一步去除.

### 2.3 低温对污泥沉降性能的影响

污泥容积指数(SVI)反映活性污泥的凝聚、沉降性能, 对生活污水和城市污水比值介于 70~100 为宜, SVI 值过低, 说明泥粒细小, 无机质

含量高, 缺乏活性; 过高, 说明污泥的沉降性能不好, 并且已有产生膨胀的可能<sup>[15]</sup>. 从图 5 可见 SVI 值一直维持在 65~115mL/g 之间, 平均值为 85.4mL/g, 在 N<sub>S</sub> 为 0.316kgCOD/(kgMLSS·d)、好氧段停留时间仅为 1.77h、反应器平均温度为 14.2℃ 的条件下, 系统稳定运行 60d, 其 SVI 值一直保持在一个较好的水平, 说明此工艺 A<sup>2</sup>O 段污泥的沉降性能良好. 镜检结果也表明污泥的聚合性能很好(图 6). 该工况 N<sub>S</sub> 较小, 这一点就可以避免由高有机负荷而引起的低温污泥膨胀. 另外, A<sup>2</sup>O 工艺厌氧-缺氧-好氧交替运行的特点使得好氧生长的丝状菌不能大量繁殖, 不易发生污泥膨胀, 使 SVI 值保持在较为合理的值. 本研究未发现低温低负荷会对 A<sup>2</sup>O-BAF 组合工艺 A<sup>2</sup>O 段的污泥沉降性能造成不利的影响.

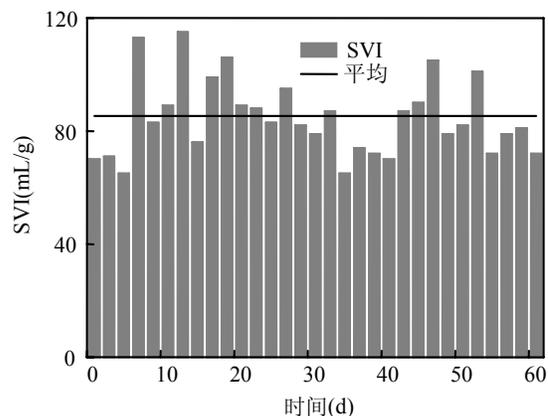


图 5 SVI 值的变化情况

Fig.5 Evolution of SVI

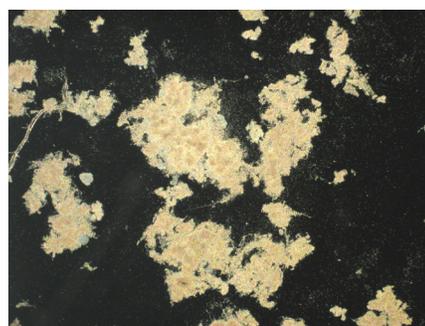


图 6 A<sup>2</sup>O 工艺中污泥镜检照片

Fig.6 Diagram of microscopic inspection for microorganisms

2.4 使用 pH 值, ORP 指示 A<sup>2</sup>O 反应器的反应情况

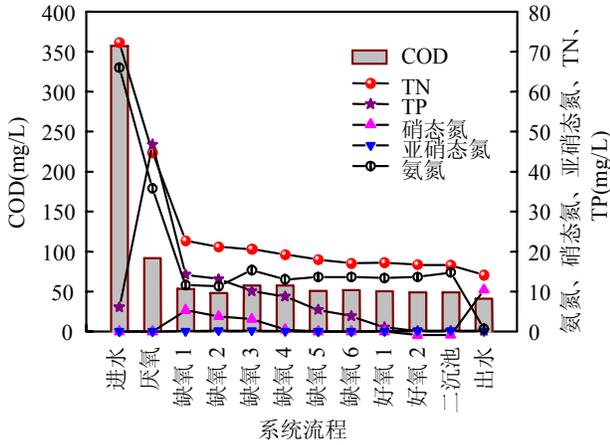
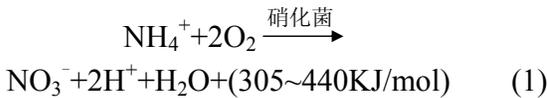


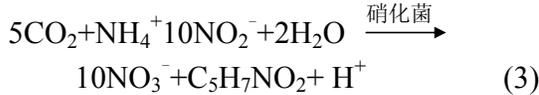
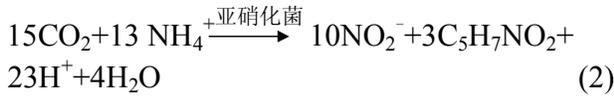
图 7 运行稳定后典型水质指标的变化情况

Fig.7 Performance of A2O-BAF system during stable stage

硝化过程总氧化式为:



硝化菌在对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 进行氧化的同时,硝化菌细胞的合成也在进行,微生物得以增长,其合成的生化反应式是:

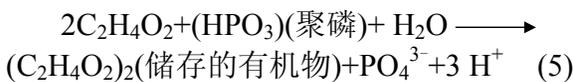


每氧化 1g NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 需消耗重碳酸盐碱度(以 CaCO<sub>3</sub> 计)7.14g.

而反硝化反应式:



在厌氧区,聚磷酸盐的降解可表示为:



在好氧区聚磷的累积:

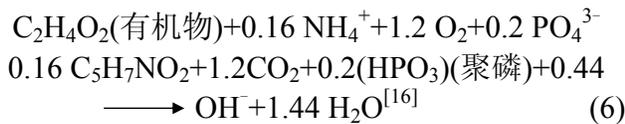


图 7 是在此工况下一个典型周期各段 COD、氮和磷的变化,图 8 则是在此变化过程中相应 pH 值和 ORP 的变化情况.进水 pH 值为 7.12,厌氧段 pH 值下降到 7.09,由式(5)可知,厌氧释磷产酸 pH 值下降,因此厌氧段相对于进水 pH 值有所下降.

在缺氧段 pH 值是逐渐增加,末段 pH 值升高到 7.71,由式(4)可得反硝化使得 pH 值上升.好氧段 pH 值有所上升,上升到 7.79,但是与 Wang 等<sup>[17]</sup>的硝化 pH 值继续下降不同,这是因为此 A<sup>2</sup>O 工艺段只进行吸磷没有硝化反应,而由式(6)可知,吸磷过程是一个 pH 值升高的过程,因此好氧段 pH 值有所升高.BAF 出水的 pH 值下降到了 7.63.由式(1)~式(3)可知硝化过程释放出 H<sup>+</sup>离子,H<sup>+</sup>离子的浓度升高,从而使得 pH 值下降.

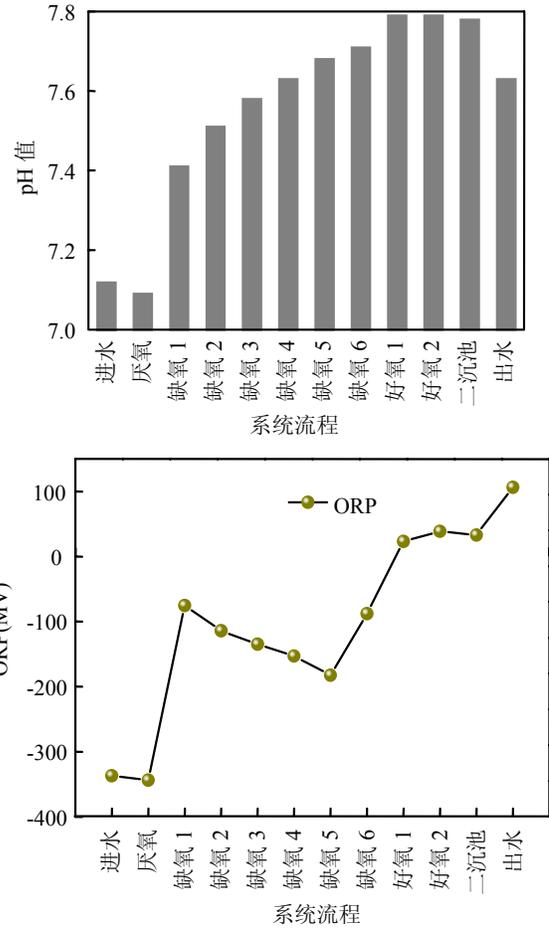


图 8 稳定运行期间典型 pH 值和 ORP 的变化  
Fig.8 Typical variation of pH and ORP along the A<sup>2</sup>O-BAF system

环境中的 pH 值对氧化还原电位也会产生影响,pH 值低时 ORP 也低;反之 pH 值高时 ORP 也高.磷释放和有机物降解的越多 ORP 和 pH 值下降越多.在缺氧环境下,大多数的生物化学反应主要是反硝化和缺氧吸磷,伴随着内循环使得大量的硝态氮回流到缺氧区 ORP 从厌氧区到缺氧区

增加,反硝化和缺氧吸磷都产生 $[\text{OH}^-]$ ,pH 值升高.但从图 8 中可以观察到 ORP 先下降后上升,这可能是由于当氧化态的离子多时,ORP 高;还原态的多时,ORP 低的原因.在缺氧 5 段  $\text{NO}_3^--\text{N}$  已经被降解完全,氧化态高的离子减少,ORP 下降.这与王亚宜等<sup>[18]</sup>的 ORP 可以作为脱氮除磷系统厌氧放磷段的控制参数,但是对于缺氧段,它只能作为电子受体是否耗尽,即硝态氮是否反硝化完全的指示性参数,无法判定系统中的磷是否吸收相符.在好氧区,主要的生物化学反应是好氧吸磷,好氧区的 DO 在保持在 1.5mg/L,由于 DO 值越高,其 ORP 值越高,因此在好氧区 ORP 从负值变化到了正值.可见 pH 值和 ORP 值可作为建立反应器自动控制系统来间接的反应生化反映的进程.

### 3 结论

3.1 采用  $\text{A}^2\text{O}$ -BAF 双污泥系统可在低温下处理低碳氮比生活污水同时达到脱氮除磷的目的.平均出水总氮和总磷分别为 13.21mg/L 和 0.23mg/L,达到国家一级 A 排放标准.

3.2 低温下污泥具有良好的沉降性能,试验期间平均的 SVI 为 85.4mL/g.

3.3 pH 值和 ORP 值可作为该系统反应间接控制参数.

#### 参考文献:

- [1] 任南琪,周大石,马放.水污染控制微生物学 [M]. 哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,1993:142-147.
- [2] 李军,杨秀山,彭永臻.微生物与水处理工程 [M]. 北京:化学工业出版社,2002:48-62.
- [3] 陈海兵,何江涛,王雨春,等.水培植物生态槽对低 C/N 污水的脱氮研究 [J]. 中国环境科学,2009,29(8):839-843.
- [4] 李洪静,陈银广,顾国维.丙酸/乙酸对低能耗生物除磷脱氮系统的影响 [J]. 中国环境科学,2008,28(8):673-678.
- [5] Henze M. Capabilities of biological nitrogen removal processes from wastewater [J]. Water Science and Technology, 1991,(23): 669-679.
- [6] Su J L, Ouyang C F. Advanced biological enhanced nutrient removal processes by the addition of rotating biological contactors [C]. The 5th IAWQ Asian Regional Conference on Water Quality and Pollution Control. Manila, Philippines. 1995.
- [7] Chuang S H. Effects of SRT and DO on nutrient removal in a

combined AS-biofilm process [C]. 6th IAWQ Asia-Pacific Regional Conference on Water Quality Conservation in Asia (Asian Waterqua 97). Seoul, South Korea. 1997.

- [8] Ding Y W, Wang L, Wang B Z. Removal of nitrogen and phosphorus in a combined A(2)/O-BAF system with a short aerobic SRT [J]. Journal of Environmental Sciences-China, 2006,18(6):1082-1087.
- [9] You S J, Chuang S H, Ouyang C F. Nitrification efficiency and nitrifying bacteria abundance in combined AS-RBC and A2O systems [J]. Water Research, 2003,37(10):2281-2290.
- [10] Lee H, Han J, Yun Z. Biological nitrogen and phosphorus removal in UCT-type MBR process [J]. Water Science and Technology, 2009,59(11):2093-2099.
- [11] Kim M, Nakhla G. The beneficial role of intermediate clarification in a novel MBR based process for biological nitrogen and phosphorus removal [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2009,84(5):637-642.
- [12] 孟雪征.冷适应微生物处理寒冷地区低温生活污水的研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2001:1-20.
- [13] 张雷.低温生活污水脱氮除磷技术研究工学硕士学位论文 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007:1-14.
- [14] 张晓丹,宋乾武,代晋国.温度及碳源对 NPR 工艺脱氮除磷效果的影响 [J]. 环境科学研究,2007,20(4):125-129.
- [15] 张自杰,排水工程 [M]. 北京:中国建筑工业出版社,1999,105-108.
- [16] 娄金生,谢水波,何少华.生物脱氮除磷理论与应用 [M]. 北京:国防科技大学出版社,2003.
- [17] Wang X. L., Peng Y. Z., Wang S. Y. Influence of wastewater composition on nitrogen and phosphorus removal and process control in A(2)O process [J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2006,28(6):397-404.
- [18] 王亚宜,彭永臻,王淑莹,等.碳源和硝态氮浓度对反硝化聚磷的影响及 ORP 的变化规律 [J]. 环境科学,2004,25(4):54-58.

作者简介: 王建华(1985-),女,黑龙江鹤岗人,北京工业大学硕士研究生,主要研究污水生物处理.发表论文 3 篇.