

# 复合生物反应器低溶解氧同步脱氮除磷

王建龙, 王淑莹, 彭永臻\*, 高永青, 孙治荣

(北京工业大学北京市水质科学与水环境恢复重点实验室, 北京 100022)

**摘要:** 利用复合生物反应器(HBR)中同时存在的活性污泥和悬浮生物膜混合生物体系, 进行了同步脱氮除磷的试验研究. 结果表明, 溶解氧浓度和进水 COD/TN 对系统脱氮除磷效果有重要影响. 当曝气量( $Q_{\text{air}}$ )控制在  $0.07 \text{ m}^3/\text{h}$  时, 系统的同步脱氮除磷效果较好, 最大释磷率(释磷结束时溶液中  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  浓度与初始  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  浓度百分比)为 249%, TN 平均去除率为 80.0%,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  去除率为 92.2%. 曝气量升高或降低, TN、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  去除率均降低. 随着 COD/TN 的升高, 系统 TN、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  去除率也逐渐升高, COD/TN 从 3.2 升高至 10.5, 系统 TN 平均去除率从 70.3% 升高至 84.9%,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  平均去除率从 82.2% 高至 96.0%. 整个试验过程中污泥体积指数(SVI)均小于  $90 \text{ mL/g}$ , 污泥的沉降性能良好. 实验采用复合反应器进水后未经过传统脱氮、除磷理论认为所必须的缺氧、厌氧段而直接曝气, 仍然取得较高的 TN、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  去除率.

**关键词:** 复合生物反应器; 脱氮; 除磷; 溶解氧

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)03-0655-05

## Simultaneous Nitrogen and Phosphorous Removal Under Low DO in a Hybrid Biological Reactor

WANG Jian-long, WANG Shu-ying, PENG Yong-zhen, GAO Yong-qing, SUN Zhi-rong

(Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

**Abstract:** Study was conducted by use of the mixed organism of activated sludge and suspended biofilm coexisting in a hybrid biological reactor (HBR) system for simultaneous nitrogen and phosphorous removal. The experimental results showed that, DO and COD/TN were the main factors affected the effluent. The maximum phosphorous releasing rate (the rate of  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  concentration at releasing end to the initial  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  concentration) was 249%, TN removal efficiency was 80.0%, and  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  removal efficiency was 92.2% by controlling the aeration rate ( $Q_{\text{air}}$ ) at  $0.07 \text{ m}^3/\text{h}$ . TN and  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  removal efficiency will be decreased, whenever aeration rate increasing or decreasing. With the increasing of COD/TN, the TN and  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  removal efficiency was increased. TN removal efficiency was increased from 70.3% to 84.9%, and  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  removal efficiency was increased from 82.2% to 96.0%, when COD/TN was increased from 3.2 to 10.5. The SVI of the activated sludge was less than  $90 \text{ mL/g}$  during the experiments. It was found during the research process that high phosphorus and nitrogen removal efficiency can be simultaneous achieved without anaerobic and anoxic phase, which was conventionally considered as a key phase for phosphorus and nitrogen removal.

**Key words:** hybrid biological reactor; nitrogen removal; phosphorous removal; DO

随着水体富营养化问题日益加剧, 污水脱氮除磷技术受到广泛关注. 复合式生物反应器(HBR)是指在活性污泥曝气池中投加填料作为微生物附着的载体, 进而形成悬浮生长的活性污泥和附着生长的生物膜, 共同承担去除污水中有机物的任务<sup>[1~3]</sup>. 与传统活性污泥法相比, HBR 工艺一是具有较高的耐有机负荷冲击能力<sup>[4]</sup>; 二是可改善污泥的沉降性能, 防止污泥膨胀, 提高系统运行的稳定性<sup>[1, 2]</sup>; 三是世代时间较长的硝化菌可优先附着在载体上, 使硝化作用不受悬浮生长的固体停留时间(SRT)的影响, 可使系统在较短的 SRT 条件下, 保持较高的硝化速率, 从而提高系统的同步脱氮除磷效率<sup>[2]</sup>.

HBR 工艺的主要构型有活性污泥-生物膜反应

器、序批式生物膜反应器、升流式厌氧污泥床-厌氧生物滤池、附着生物污水稳定塘、厌氧-缺氧-好氧复合式生物膜反应器等<sup>[5~7]</sup>. 这些研究均表明, 复合式生物反应器是提高有机物去除能力行之有效的方法, 既可以用于现有污水处理厂改建和扩建, 又可以用于新建的污水处理厂. 试验以实际生活污水为对象, 利用有效容积为 12L 的间歇式复合生物反应器(填料填充比为 30%), 研究了低溶解氧(DO)条件下

收稿日期: 2007-03-11; 修订日期: 2007-04-29

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA06Z319); 国家自然科学基金项目(50778005); 北京市自然科学基金项目(8062006)

作者简介: 王建龙(1978~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为污水生物处理及其过程控制, E-mail: wjl\_xt@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: pyz@bjut.edu.cn

系统的脱氮除磷效果,以及 DO、碳氮比(COD/TN)对系统同步硝化反硝化脱氮及除磷性能的影响.

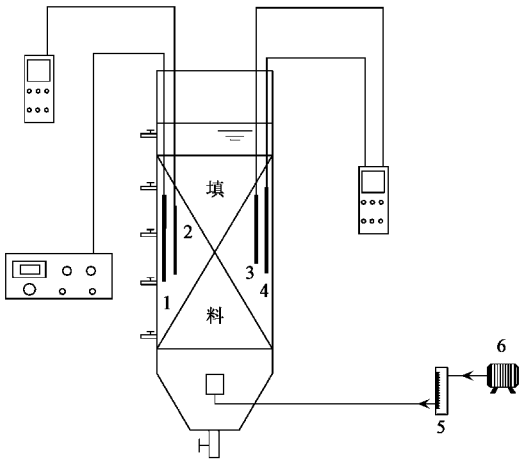
### 1 材料与方法

#### 1.1 试验设备

试验所用反应器如图 1 所示,为圆柱形,高 50 cm,直径 20 cm,有效容积 12 L,有机玻璃制.采用鼓风机曝气,用转子流量计调节并维持曝气量,用温控仪和加热器调控水温.反应器内部填充瑞琪生物填料,其物理性能见表 1.载体挂膜后的填充率为 30%.

#### 1.2 试验水质与监测方法

试验采用北京某大学家属区生活污水为对象,通过加自来水稀释和投加醋酸钠、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 、 $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,调节进水 COD、TN、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  浓度,试验期间水温控制在  $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ ,主要水质参数及检测方法见表 2.



1. 温度控制器;2. ORP 仪;3. pH 仪;  
4. DO 仪;5. 气体流量计;6. 曝气器

图 1 试验设备

Fig. 1 Experiment reactor

表 1 瑞琪生物填料物理性能  
Table 1 Characteristics of Rich carrier

| 材料   | 密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ | 丝直径/mm  | 空隙率/% | 压缩强度/kPa  | 断裂伸长率/%   | 连续耐热温度/ $^\circ\text{C}$ | 耐酸碱稳定性 |
|------|-----------------------------------|---------|-------|-----------|-----------|--------------------------|--------|
| 聚丙烯类 | 0.9~0.92                          | 1.5~0.8 | 90~95 | 41.2~49.2 | 3.60~3.97 | 80~100                   | 稳定     |

表 2 污水水质及检测方法/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$   
Table 2 Main parameters of wastewater and analytical methods/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

| 项目      | COD              | $\text{NO}_3^- \text{-N}$ | $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ | $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ | $\text{NO}_2^- \text{-N}$ | TOC/TN            |
|---------|------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|---------------------------|-------------------|
| 试验用水/均值 | 293              | 0.75                      | 40.1                      | 10.3                         | 0.43                      | 111/46.3          |
| 检测方法    | 5B-1 型 COD 快速测定仪 | 麝香草酚分光光度                  | 纳氏试剂法                     | 钼锑抗分光光度法                     | N-(1-萘基)-乙二胺光度法           | Multi TOC/TN 3000 |

#### 1.3 试验方案

为了考察 DO、COD/TN 对复合反应器同步硝化反硝化脱氮及除磷的影响,分别进行了 2 个模式的试验.模式 1 只改变曝气量,其它参数保持恒定,模式 2 只改变进水  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  浓度,其它参数保持恒定.反应器的运行方式均为:进水(瞬间)–曝气(660 min)–沉淀(40 min)–排水(20 min),没有缺氧或厌氧阶段,每天运行 2 个周期,每种运行模式下系统容积交换率均为 0.5,污泥龄为 8 d,污泥浓度控制在  $3\,000\text{ mg/L}$ .

#### 1.4 污泥驯化及挂膜

试验所用污泥取自北京某污水厂氧化沟工艺二沉池回流污泥,采用逐渐提高进水  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  浓度的方法对污泥进行驯化.整个启动过程共分为 3 个阶段:第 1 阶段,不控制曝气量,进水  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  浓度逐渐从  $20\text{ mg/L}$  增加到  $60\text{ mg/L}$ ,经过 10 d 的驯化,出水  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  浓度降低到  $5\text{ mg/L}$  以下,反应器的  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  去

除负荷达到  $0.51\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ ,  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  去除率超过 98%,而此时填料表面的生物膜尚未完全形成;然后进入第 2 阶段,又经过 10d 的运行发现填料表面已附着一层厚度约  $0.6\text{ mm}$  的生物膜,并且通过显微镜观察发现生物膜中含有大量微生物,以后生动物为主;第 3 阶段,控制曝气量在  $0.07\text{ m}^3/\text{h}$ ,经过 30 d 的运行后,好氧结束时反应器中的溶解氧稳定在  $1.5\sim 2.0\text{ mg/L}$ ,系统 TN 平均去除率达 80%,  $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$  平均去除率为 92%.至此,整个系统的污泥驯化和填料挂膜阶段结束.

### 2 结果与讨论

#### 2.1 氮、磷去除效果

系统对 TN 的去除效果见图 2,进水 TN 为  $35.4\sim 53.1\text{ mg/L}$ ,出水 TN 平均为  $10.4\text{ mg/L}$ ,TN 的去除率为 76.9%~83.9%,平均去除率为 80.0%.在如此低的溶解氧浓度下仍能取得良好的同步硝化反硝化

脱氮效果,分析原因可能有:①曝气时间足够长,即使在 DO 较低的情况下,也可保证溶解氧对生物絮体具有一定的穿透能力;②填料表面附着生长了大量异养硝化菌,其特点是适合在低 DO 浓度下生长;③低溶解氧情况下形成的更多的缺氧微环境使反硝化更容易进行。

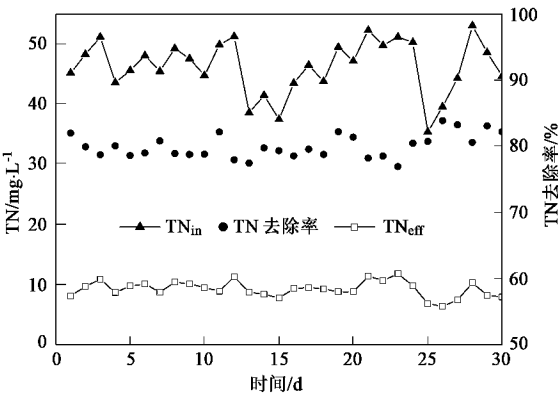


图2 HBR对TN的去除效果

Fig.2 Removal efficiency of total nitrogen by HBR system

进、出水的  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  含量及去除率如图3所示,进水  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  为 6.72 ~ 10.3 mg/L,出水  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  为 0.44 ~ 0.95 mg/L,去除率为 90.5% ~ 94.1%,平均去除率为 92.2%。在全程曝气的情况下系统仍取得了较好的除磷效果,主要是由于在整个运行周期内反应器内仍存在着厌氧、好氧的环境,使聚磷菌在反应器内得以富集生长,此外,较短的污泥龄(SRT = 8 d)也是导致系统除磷效果较好的原因。

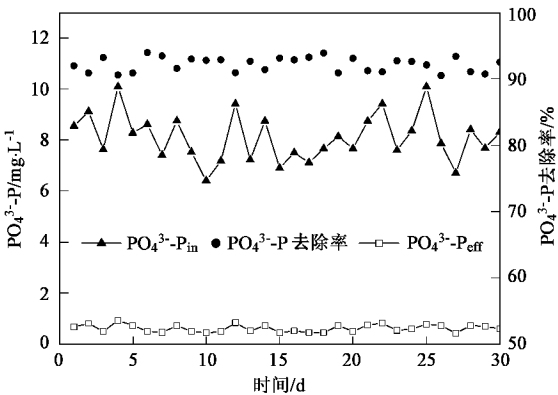


图3 HBR对PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P的去除效果

Fig.3 Removal efficiency of total phosphorus by HBR system

2.2 典型周期内的特征曲线

图4为一个典型周期内 COD、TN、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  浓度变化曲线。在曝气量为 0.07 m<sup>3</sup>/h 条件下,经过 11h

的曝气,实现了良好的同步硝化反硝化脱氮及除磷效果。 $\text{COD}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{TN}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  平均去除率分别为 96.0%、98.0%、80.0%、92.2%。由图4可见,在曝气最初的 3h 反应器内  $\text{DO} < 0.2 \text{ mg/L}$ ,DO 变化曲线出现 1 个平台,系统实际处于厌氧状态,聚磷菌将水中的有机物转变为高能内聚物(PHB)的同时释放磷,2h 左右反应器中  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  达最大值 18.7 mg/L,释磷率为 249%,这说明系统中的微生物在低氧条件下吸收有机物将其转变为 PHB 的能力较强。3 h 左右反应器中的溶解氧浓度由 0.15 mg/L 升高至 0.4 mg/L,pH 变化曲线上出现了拐点  $\alpha$ ,DO 变化曲线上出现了拐点 A,COD 浓度从 280 mg/L 降至 60 mg/L 左右。3 ~ 10 h 左右系统中 DO 从 0.4 mg/L 升高至 1.5 mg/L,聚磷菌以氧和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  作为电子受体吸磷,同时发生传统的好氧吸磷现象,其间伴随着同步硝化反硝化脱氮过程,从 TN 变化曲线可知,该时间段 TN 去除率超过 70%,10 h 左右系统中的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  全部转化为  $\text{NO}_x^-\text{-N}$  ( $\text{NO}_2^-\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ),pH、DO 变化曲线上分别出现了  $\beta$ 、B 2 个拐点,分别指示着硝化过程的结束,好氧段结束时,反应器中的 TN 平均浓度为 9.82 mg/L,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  平均浓度为 0.72 mg/L。

2.3 DO对脱氮除磷效果的影响

在进水水质条件保持不变的条件下,通过调节气体流量计将曝气量分别控制在 0.04、0.07、0.10 m<sup>3</sup>/h,考察了 DO 对同步硝化反硝化脱氮及除磷效果的影响,结果见图5。3 种曝气量条件下系统的 TN 平均去除率分别为 60.1%、80.4%、69.8%,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  平均去除率分别为 52.3%、90.4%、77.5%。本试验条件下,在曝气量为 0.07 m<sup>3</sup>/h 时,系统的脱氮除磷效率最高,主要是由于 DO 较低时虽然释磷效果较好,但吸磷和硝化过程受到抑制,DO 较高时同步硝化反硝化和释磷过程均受到抑制。由此可见,通过控制反应器内得 DO 浓度可以有效提高脱氮除磷效率。传统的除磷理论认为必须在反应器中控制严格的厌氧条件,这直接关系到聚磷菌的生长状况、释磷能力及利用有机基质合成 PHB 的能力。在 HBR 工艺中,全程曝气条件下仍取得了较高的  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  去除率,分析主要有以下 2 个原因:①在曝气开始 3 h 内(见图4),反应器内  $\text{DO} < 0.2 \text{ mg/L}$ ,基本处于厌氧状态,释磷率达 249%;②较短的固体停留时间(SRT = 8 d)。因此,控制 DO 在一个最佳的范围内是实现复合生物反应器同步脱氮除磷的关键因素。

2.4 COD/TN对脱氮除磷效果的影响

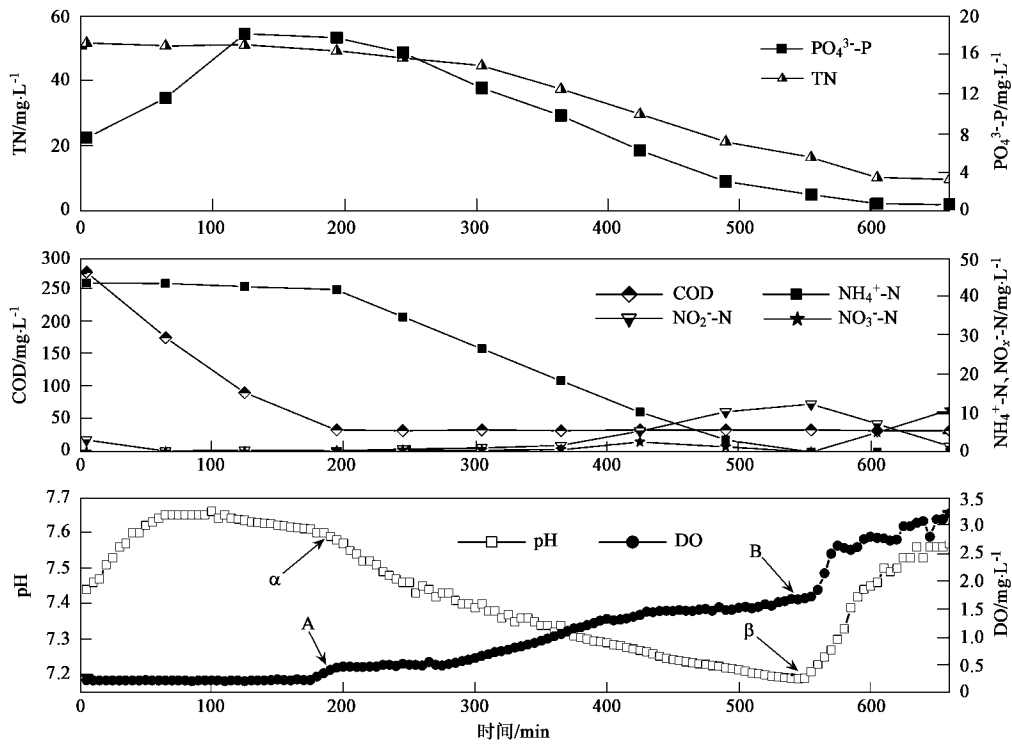


图 4 典型周期内的特征曲线

Fig.4 Characteristic profiles in a typical cycle

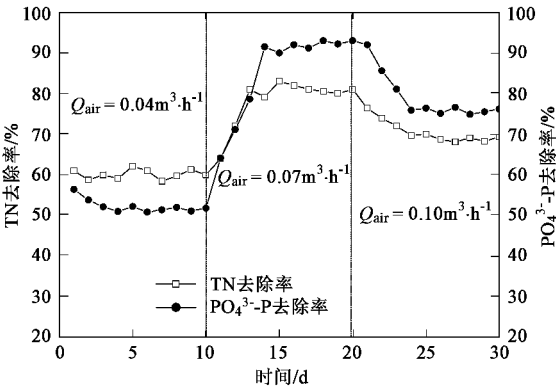


图 5 DO 对脱氮除磷效果的影响

Fig.5 Effect of DO on the nitrogen and phosphorous removal

控制曝气量和其它水质参数不变, COD/TN 对 TN、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  去除率变化影响见图 6. 由图 6 可以看出, 随着 COD/TN 的升高, TN 去除率由 70.6% (COD/TN = 3.2) 逐渐升至 84.9% (COD/TN = 10.5),  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  去除率由 82.2% (COD/TN = 3.2) 升至 96.0% (COD/TN = 10.5); 但是当 COD/TN 超过 6 后, TN、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  去除率提高的并不明显. 本阶段试验保持进水 COD 浓度不变, 通过改变进水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度来改变 COD/TN, 随着进水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  负荷的降低, 硝化速率逐渐降至最

小值[0.018 g/(g·d)], 反硝化速率逐渐升高, 出水中  $\text{NO}_x^-\text{-N}$  浓度逐渐降低, TN 去除率升高. 当 COD/TN 较高时, 系统内碳源充足, 有利于同步硝化反硝化脱氮. COD/TN 越高, 在运行初始阶段释磷越充分, 在后续好氧阶段吸磷量也越大. 因此, 随着进水 COD/TN 的升高, 系统同步硝化反硝化脱氮及除磷效率均升高.

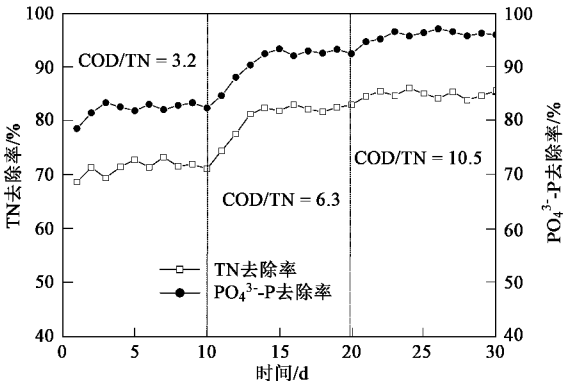


图 6 COD/TN 对脱氮除磷效果的影响

Fig.6 Effect of COD/TN on the nitrogen and phosphorous removal

2.5 污泥体积指数(SVI)变化

大量研究表明, 低溶解氧情况下更容易实现同

步硝化反硝化<sup>[8~13]</sup>,但长期低溶解氧运行时污泥的沉降和吸附性能变差,容易引起污泥膨胀,从而导致系统脱氮除磷效果很不稳定<sup>[14]</sup>.整个试验过程中SVI的变化如图7所示.在系统启动阶段,曝气量控制在0.1 m<sup>3</sup>/h,随着运行天数增加,SVI值逐渐降低,第30 d左右SVI值由最初的115 mL/g降至65 mL/g,第30~60 d,曝气量控制在0.07 m<sup>3</sup>/h,SVI值稳定在65 mL/g左右,并且通过显微镜观察发现在较低曝气量( $Q_{\text{air}}=0.07\text{ m}^3/\text{h}$ )条件下系统中未发生丝状菌大量繁殖.第60~90 d,曝气量先降低至0.04 m<sup>3</sup>/h,然后升高至0.15 m<sup>3</sup>/h,SVI先由65 mL/g逐渐升高至84 mL/g,然后又逐渐降至53 mL/g.第90~120 d,曝气量控制在0.07 m<sup>3</sup>/h,随着COD/TN的升高,SVI值逐渐降低.系统启动后试验过程中污泥沉降性能良好,SVI均小于90 mL/g.

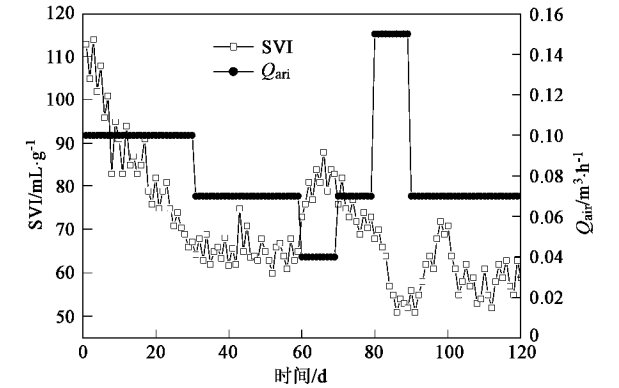


图7 污泥体积指数(SVI)变化

Fig.7 Change of SVI during the while experiment

3 结论

- (1)利用复合生物反应器在全程曝气的情况下,通过控制曝气量,实现了同步脱氮及除磷过程.试验条件下,在曝气量为0.07 m<sup>3</sup>/h时,系统的脱氮除磷效果较好,TN平均去除率为80.0%,PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P去除率为92.2%.
- (2)随着进水中COD/TN升高,系统TN、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P去除率逐渐升高,TN去除率由70.6%(COD/TN=3.2)升至84.9%(COD/TN=10.5),PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P去除率由82.2%(COD/TN=3.2)升至96.0%(COD/TN=10.5).
- (3)污泥驯化完成后,试验过程中污泥的体积指

数(SVI)均小于90 mL/g,污泥的沉降性能良好.与传统活性污泥法相比,复合生物反应器具有较高耐负荷冲击能力和同步脱氮除磷效率.

参考文献:

[1] 王建龙,吴立波,钱易.复合生物反应器处理废水特性的研究[J].中国给水排水,1998,14(2):29-32.

[2] Wanner J, Kucman K, Grau P. Activated sludge process combined with biofilm cultivation[J]. Water Research, 1988, 22(2): 207-215.

[3] Gebara F. Activated sludge biofilm wastewater treatment system[J]. Water Research, 1998, 33(1): 230-238.

[4] Hyung S L, Se J P, Tai I Y. Wastewater treatment in a hybrid biological reactor using powdered minerals: effects of organic loading rates on COD removal and nitrification[J]. Process Biochemistry, 2002, 38: 81-88.

[5] Yung K P, Chul H L. Dyeing wastewater treatment by activated sludge process with a polyurethane fluidized bed biofilm[J]. Water Science and Technology, 1996, 34(5-6): 193-200.

[6] Su J L, Ouyang C F. Nutrient removal using a combined process with activated sludge and fixed biofilm[J]. Water Science and Technology, 1996, 34(1-2): 477-486.

[7] Chuang S H, Ouyang C F, Yuang H C, et al. Effects of SRT and DO on nutrient removal in a AS-biofilm process[J]. Water Science and Technology, 1997, 36(12): 19-27.

[8] Zhao H W, Mavinis D S, Oldham W K, et al. Ccontrolling Factors for Simultaneous Nitrification and Denitrification in a Two Tage Intermittent Aeration Process Treating Domestic Sewage[J]. Water Research, 1996, 33(4): 961-970.

[9] Helmer C, Kunst S. Simultaneous nitrification/denitrification in an aerobic biofilm system[J]. Water Science and Technology, 1998, 30: 183-187.

[10] Holman J, Wareham D. Oxidation-reduction potential as a monitoring tool in a low dissolved oxygen wastewater treatment process[J]. Journal of Environmental Engineering, 2003, 129(1): 52-58.

[11] Pochana K, Keller J, Lant J. Model development for simultaneous nitrification and denitrification[J]. Water Science and Technology, 1999, 39(1):235-243.

[12] Puznava N, Payraudeau M, Thornberg D. Simultaneous nitrification and denitrification in biofilters with real-time aeration control[J]. Water Science and Technology, 2000, 43(1):269-276.

[13] Kugleman I J, Spector M, Harvilla A, et al. Aerobic denitrification in activated sludge[J]. Environmental Engineering, 1991, 5(21): 312-318.

[14] Hao X D, Hans J D, Groenestijn J W. Conditions and Mechanisms Affecting Simultaneous Nitrification and Eenitrification in a Pasveer Oxidation Ditach[J]. Bioresource Technology, 1996, 59(197): 207-215.