

# 智能化控制 SBBR 处理不同 C/N 城市污水脱氮除磷性能研究

金云霄<sup>1,2</sup>, 冯传平<sup>1\*</sup>, 丁大虎<sup>1</sup>, 郝春博<sup>1</sup>, 宋琳<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 洛阳理工学院土木工程系, 洛阳 471023)

**摘要:**采用自主研发的智能化控制系统,以智能化控制的运行方式使序批式生物膜反应器(SBBR)形成交替运行的好氧-缺氧环境,对不同 C/N 人工模拟城市污水进行了脱氮磷实验研究。该实验中控制反应器内水温为  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ,曝气量为  $150\text{ L/h}$ ,进水 COD 浓度为  $300\text{ mg/L}$ ,TP 浓度为  $5\text{ mg/L}$ ,以 TN 浓度为  $30, 60, 90\text{ mg/L}$  分别运行了  $15, 20, 20\text{ d}$ 。结果表明,当 C/N 分别为  $10, 5, 3.3$  时,COD 的平均去除率分别达到  $85.2\%, 91.1\%, 97.7\%$ ;而 TP 的平均去除率分别达到  $94.1\%, 95.9\%, 96.7\%$ ;  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的平均去除率分别达到  $95.8\%, 99.2\%, 80.0\%$ ;TN 平均去除率则分别达到  $90.7\%, 81.1\%, 58.3\%$ 。C/N 对氮的去除影响较大,随着 C/N 的降低,TN 的去除率随之降低,而 COD 和 TP 的去除率略有升高。智能化控制 SBBR 中存在着同步硝化反硝化和短程同步硝化反硝化,C/N 越高,反硝化程度越高。智能化控制 SBBR 在进水后未经厌氧释磷,直接以好氧-缺氧方式运行,具有良好的除磷效果,和传统的厌氧释磷好氧吸磷理论和研究有所不同。

**关键词:**智能化控制;序批式生物膜反应器;C/N;脱氮除磷

中图分类号:X703.1 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2011)03-0729-07

## Performance of Nitrogen and Phosphorus Removal from Municipal Wastewater of Different C/N Ratios Using Intelligent Controlled Systems Sequencing Batch Biofilm Reactor (SBBR)

JIN Yun-xiao<sup>1,2</sup>, FENG Chuan-ping<sup>1</sup>, DING Da-hu<sup>1</sup>, HAO Chun-bo<sup>1</sup>, SONG Lin<sup>1</sup>

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Department of Civil Engineering, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

**Abstract:** The laboratory-scale experiments were conducted to treat synthetic municipal wastewater at different C/N ratios, using a developed intelligent controller sequencing batch biofilm reactor (SBBR), which formed alternative aerobic-anoxic environment. The performance of nitrogen and phosphorus removal was investigated under different conditions ( $T = 25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ,  $V_{\text{aeration}} = 150\text{ L/h}$ , COD =  $300\text{ mg/L}$ , TP =  $5\text{ mg/L}$ , TN =  $30\text{ mg/L}$ ,  $t_{\text{operation}} = 15\text{ d}$ ; TN =  $60\text{ mg/L}$ ,  $t_{\text{operation}} = 20\text{ d}$ ; TN =  $90\text{ mg/L}$ ,  $t_{\text{operation}} = 20\text{ d}$ ). The average removal efficiency of COD reaches  $85.2\%$ ,  $91.1\%$  and  $97.7\%$ , the average removal efficiency of TP achieves  $94.1\%$ ,  $95.9\%$ ,  $96.7\%$ , the average removal efficiency of  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  reaches  $95.8\%$ ,  $99.2\%$ ,  $80.0\%$ , and the average removal efficiency of TN are  $90.7\%$ ,  $81.1\%$ ,  $58.3\%$ , respectively. With the decrease of C/N ratios, the removal efficiency of N decreases significantly, while the removal efficiency of COD and TP increase slightly. In intelligent controlled SBBR, simultaneous nitrification and denitrification and shortened simultaneous nitrification and denitrification occur, meanwhile, the denitrification of the system strengthens with the increasing of C/N ratios. After the influent finished, intelligent controlled SBBR starts to operate in aerobic-anoxic environment. The efficiency of phosphorus removal is high, moreover, the theory of phosphorus removal is different from the conventional theory of release anaerobic and uptake aerobic phosphorus.

**Key words:** intelligent controlled; sequencing batch biofilm reactor (SBBR); C/N; nitrogen and phosphorus removal

控制水体富营养化,防止水体污染最根本的途径是对污染源进行治理,控制污染物排放量,使污水处理厂出水中的氮、磷达标排放。目前,世界各国的污水排放标准日趋严格,许多新建和原有污水处理厂都面临着氮、磷达标排放的压力。

序批式生物膜反应器(SBBR)是一种新型的复合式生物膜反应器,也是目前国内外学者正在研究的脱氮除磷新工艺。SBBR以时间为时序,生物反应在单池内进行,不需要物理分区,基建费用低;反应

器内生物量多,耐冲击负荷;污泥产量低,不存在污泥膨胀等问题<sup>[1-6]</sup>。

SBBR被国内外学者成功地用于处理多种废水,

收稿日期:2010-03-16;修订日期:2010-08-12

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07102-002);“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAJ08B04);国家高新技术研究发展计划(863)项目(2007AA06Z351)

作者简介:金云霄(1972~),女,博士研究生,副教授,主要研究方向为水处理技术, E-mail: jyx9988@126.com

\* 通讯联系人, E-mail: fengchuanping@gmail.com

诸如制革废水<sup>[1,2,7]</sup>、金矿含氰废水<sup>[8]</sup>、垃圾渗滤液<sup>[9,10]</sup>、养猪场废水<sup>[11]</sup>等. SBBR 也被用于城市污水的脱氮除磷研究<sup>[3,12]</sup>. SBBR 内的微生物附着在载体上形成生物膜, 污泥龄和食物链长; 生物膜具有一定的厚度, 好氧条件下, 存在着缺氧微环境, 能够发生同步硝化反硝化, 脱氮效率高. 在过去的生物除磷研究中, 应用最多的是生物强化除磷系统 (EBPR)<sup>[3,6,11,13,14]</sup>. 该系统在厌氧条件下, 聚磷菌 (PAOs) 摄取污水中的挥发性脂肪酸, 同化成胞内碳能源存贮物 (PHA); 而在好氧条件下, 聚磷菌利用胞内 PHA 作为碳源及能源进行正常的好氧代谢产生能量, 用于磷的吸收和聚磷的合成, 能量以聚磷酸高能键的形式捕积存贮, 从而实现了磷的大量吸收, 磷从液相中去除. 厌氧环境充分地释磷是好氧环境过量吸磷的前提条件. 据此理论, 国内外学者在生物除磷方面做了大量的研究工作, 并取得了丰硕的成果. 然而, 最新的部分研究成果表明<sup>[15,16]</sup>, 厌氧释磷并非除磷的必要条件, 该发现与上述经典理论明显不同.

过去, 污水处理自动控制的研究主要集中在 DO、pH、ORP 等参数的实时在线控制<sup>[17~19]</sup>, 但设定的控制值复杂, 不能快速适应进水水质的变化. 实际上, 污水生物处理是供氧和耗氧的过程, 因此, DO 作为重要的影响参数, 将会影响工艺的处理性能<sup>[17]</sup>. 同时, 水温是影响微生物生理活动的重要因素, 污水的生化反应速度与温度的关系非常密切. 但是迄今为止, 在自动控制系统中, 鲜见以 DO 和温度为控制参数的相关研究. 本研究开发的智能化控制系统根据不同温度和不同污水浓度时, 微生物所对应的呼吸速率来调节曝气时间和反硝化所需要的曝气停止时间, 从而能够提高系统的氧气利用率, 达到节能的目的.

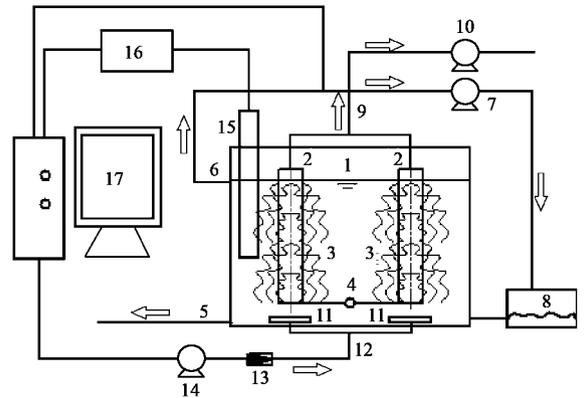
本研究采用一种混纺棉线软性填料的 SBBR, 以人工配水模拟城市污水, 应用智能化控制系统 (intelligent controlled system, ICS) 按时间顺序形成交替运行的好氧-缺氧环境, 以 DO、温度为控制参数, 对 SBBR 污水处理系统进行实时控制, 研究智能化控制 SBBR 的脱氮除磷机制和性能.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置

实验装置如图 1 所示, 反应器为有机玻璃制成, 壁厚 12 mm, 长 × 宽 × 高 = 400 mm × 250 mm × 300 mm, 总容积 30 L, 有效容积 20 L (去除填料容

积), 有效水深 220 mm. 集水器为高 260 mm, 直径 40 mm 的圆柱筒, 表面设有直径为 0.5 mm 的集水孔, 中心孔距: 横向为 25.1 mm, 纵向为 45 mm. 圆柱筒开孔高度为 180 mm, 顶端设出水管, 由水泵动力排水; 而底部设出水管, 则可通过重力排水. 集水器外悬挂一层混纺棉线, 供微生物挂膜. 供氧采用黏结砂芯曝气沙盘, 通过气泵供气, 以转子流量计控制供气量大小, 使用 DO 仪在线监测和控制溶解氧 (DO) 浓度, 同时传输反应器内水温的变化情况, 设置循环泵, 通过循环水流起水浴控温和搅拌作用. 运行中, 控制水温为  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ . 智能化控制系统由 PC 机、PLC、和控制软件组成, 控制反应器的好氧、缺氧反应时间.



1. 反应器 2. 圆柱体筒 3. 混纺棉线填料 4. 底部出水管 5. 放空管
6. 循环管 7. 循环水泵 8. 水浴槽 9. 上部出水管 10. 出水泵
11. 曝气砂盘 12. 曝气管 13. 转子流量计 14. 空压机 15. DO 探头
16. DO 控制器 17. 电脑

图 1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

### 1.2 混纺棉线填料

生物膜载体填料 (混纺棉线) 的表面凸凹不平, 呈波纹状. 空隙率为 98%, 比表面积约为  $2800 \text{ m}^2/\text{m}^3$ , 填充率 10%, 具有巨大的比表面积和粗糙的表面, 对反应器中微生物有较强的持留作用, 利于微生物生长. 混纺棉线悬挂于集水器外, 运行时悬浮于水中, 利于其上生长的微生物和水中的基质接触, 传质效果好. 由集水器、混纺棉线组成的膜组件, 集吸附和过滤于一体; 出水时, 水流经过生物膜 → 集水器上微小孔洞 → 圆柱筒内排水管流出, 在此过程中, 生物膜组件起到了过滤的作用, 不仅截留了污水中的悬浮物, 减少了沉淀时间和沉淀体积, 还缩小了反应器容积, 省去了常规污水处理流程中的沉淀工艺.

### 1.3 实验用水和水质参数检测分析方法

实验用水采用人工配水,配水成分为:碳源、氮源、磷源分别由葡萄糖、氯化铵、磷酸二氢钾提供,并通过加入少量牛奶以补充微生物所需的微量元素,配水后实测水质指标如表 1 所示。

水质参数检测分析方法采用国家环境保护总局

规定的方法<sup>[20]</sup>,其中 COD 采用重铬酸钾氧化法,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  采用纳氏试剂光度法, TN 采用紫外分光光度法,  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  采用  $N - (1 - \text{萘基}) - \text{乙二胺}$  光度法,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  采用紫外分光光度法, TP 采用钼锑抗分光光度法, DO 和温度采用在线 DO 仪测定, MLSS、MLVSS 采用重量法。

表 1 配水水质指标

Table 1 Quality of synthetic wastewater

COD/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	TN/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$			NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> - N/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$			TP/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	pH
	C/N = 10	C/N = 5	C/N = 3.3	C/N = 10	C/N = 5	C/N = 3.3		
308.45 ~ 362.88	30.61 ~ 38.37	59.26 ~ 67.23	88.66 ~ 96.03	28.46 ~ 34.90	58.38 ~ 66.97	86.06 ~ 95.65	4.43 ~ 6.37	6.8 ~ 7.2

### 1.4 实验方法

接种污泥取自北京市清河污水处理厂二沉池回流污泥,取回的污泥沉降性能良好, MLSS 为 8 420  $\text{mg/L}$ , MLVSS 为 5 280  $\text{mg/L}$ , MLVSS/MLSS 为 0.63。

接种污泥静沉 1 d 后,取 5 L 加入 2 个反应器中,以合成污水浓度约为 COD 30  $\text{mg/L}$ 、TN 30  $\text{mg/L}$ 、TP 5  $\text{mg/L}$ ,反应器按序批方式运行,由计时器控制驯化培养污泥。运行周期为:瞬时进水→厌氧(3 h)→曝气(9 h)→沉淀(10 min)→排水(10 min),每周换水 1 次。由于混纺棉线载体具有很强的吸附能力,所以挂膜启动快,1 周后,棉线上覆盖了一层 1 ~ 2 mm 的生物膜,每天取进、出水样测定的 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率分别达到 80%、60%。综合填料挂膜后生物膜外观、显微镜观察和处理效能,认为填料挂膜成熟。取一单位生物膜载体洗脱称量,换算出整个系统生物量为 5 720  $\text{mg/L}$ ,而活性污泥法的 MLSS 一般为 3 000 ~ 4 000  $\text{mg/L}$ ,表明 SBBR 生物量丰富。

反应器挂膜成熟后,实施智能化控制。智能化控制系统的控制机制是在不同温度条件下,根据反应器内溶解氧升降斜率来确定当前温度条件下的硝化反硝化反应的时间,对硝化菌和反硝化菌完成脱氮过程的硝化和反硝化及除磷菌吸释磷的时间进行控制,进而控制系统的 DO 值,达到脱氮除磷的目的。智能化控制系统的控制方法:连续自动监测反应器内 DO 浓度→计算微生物的呼吸速度→计算下一反应周期微生物呼吸所需要的氧量→计算下一反应周期的曝气时间和停止曝气时间。

智能化控制 SBBR 启动后,系统进入计算阶段,该阶段包括曝气阶段和缺氧阶段。曝气阶段曝气装置曝气 30 min 后,若  $\text{DO} \geq$  低限 DO 值,停止曝气(若  $\text{DO} \leq$  低限 DO 值时,曝气装置继续运行 10 min 后,再次与低限 DO 值进行比较,直到符合  $\text{DO} \geq$  低

限 DO 值),启动回流装置,缺氧回流 30 min 后(若  $\text{DO} \geq$  低限 DO 值时,曝气装置继续运行 10 min 后,再次与低限 DO 值进行比较,直到符合  $\text{DO} \leq$  低限 DO 值),在此计算过程内,软件根据反应器内 DO 升降斜率来确定此温度条件下硝化反硝化和除磷菌吸释磷反应进行的时间,即反应阶段的好氧缺氧时间,计算所得的硝化反硝化时间各减去计算阶段的曝气和缺氧回流时间,即为反应阶段内的曝气时间  $t_1$  和缺氧时间  $t_2$ 。反应阶段以 2 h 为 1 个反应周期,即曝气时间  $t_1$  和缺氧时间  $t_2$  之和为 120 min。而且,不同的周期,  $t_1$ 、 $t_2$  的值不同,  $t_1$ 、 $t_2$  值随反应器中的水温和 DO 浓度而变化。

本研究中,设置低限 DO 为 0.5  $\text{mg/L}$ ,所以,即使在停止曝气阶段,反应器中 DO 最小值为 0.5  $\text{mg/L}$ ,处于缺氧状态,因此,反应器在运行过程中无厌氧状态存在。

实验阶段,控制水温为  $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ ,曝气量 150  $\text{L/h}$ ,始终使反应器内的污泥龄基本保持在 26 d 左右。反应器进水 COD 浓度为 300、TP 浓度为 5  $\text{mg/L}$ ,以 TN 浓度为 30、60、90  $\text{mg/L}$  分别运行了 15、20、20 d,考察了智能化控制 SBBR 去除有机物、脱氮除磷的效能和机制。

## 2 结果和讨论

### 2.1 智能化控制 SBBR 对不同 C/N 城市污水的除污效能

#### 2.1.1 对 COD、TP 的去除效果

如图 2 所示,在整个实验过程中,以混纺棉线为填料的智能化控制 SBBR 对 COD 的去除效果良好。当 C/N 为 10、5、3.3 时, COD 平均出水浓度分别为 50.00、28.87、7.90  $\text{mg/L}$ ,平均去除率分别达到 85.2%、91.1%、97.7%,出水中 COD 浓度均达到了

城市污水排放标准 GB 18918-2002 的一级 A 标准. 说明反应器内基质与附着在混纺棉线上的生物膜接触良好, 利于微生物对基质的去除. 随着 C/N 的降低, COD 出水浓度越来越低, 表明 C/N 较低时, 有机物是微生物生长的限制因素; 随着氮负荷的升高, 反硝化需要的碳源增多, 因此当 C/N 较低时, 出水 COD 浓度较低. Stall 等<sup>[21]</sup>的实验结果表明, C/TP > 64 才可能取得较好的除磷效果; 而罗固源等<sup>[22]</sup>则发现 C/TP > 47 时, 即有良好的除磷效果, 因此, 该阶段实验中 C/TP 保持在 60 左右, 整个实验过程中, 进水 TP 浓度为 5 mg/L, 反应器对磷的去除效果良好. 当 C/N 为 10、5、3.3 时, 其平均去除率分别达到 94.1%、95.9%、96.7%, 随 C/N 的降低, TP 去除率略有升高的趋势, 但不显著. 由图 2 可知, 在高、中、低 3 个 C/N 状态下, 仅有个别点出水浓度 > 0.5 mg/L (< 1 mg/L), 其它时间都保持在 < 0.5 mg/L, 符合 GB 18918-2002 一级 A 标准. 尤其是 C/N 为 3.3 时, 出水 TP 浓度更为稳定, TP 平均浓度为 0.18 mg/L, 最高浓度为 0.42 mg/L, 说明不同的 C/N 对磷的去除没有影响. Kim 等<sup>[3]</sup>研究了 SBR 和 SBBR 在不同氨氮负荷率下的脱氮除磷性能, 结果表明 SBBR 高氨氮负荷率对磷的去除没有影响, 而 SBR 在高氨氮负荷率时对磷的去除率变差, 本研究取得的上述结果与 Kim 等的看法一致.

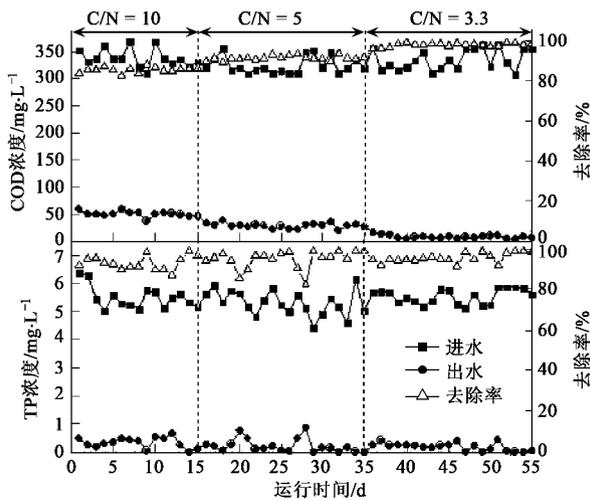


图 2 对不同 C/N 城市污水 C、P 的去除效果

Fig. 2 Effects of C and P removal on municipal wastewater of different C/N ratios

### 2.1.2 对 N 的去除效果

如图 3 所示, 智能化控制 SBBR 在整个实验过程中, 对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN 均具有良好的去除效果. 实验

进行 2 d 后, 智能化控制 SBBR 出水  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  由 9.46 mg/L 降为 4.08 mg/L, 而后逐渐趋近于 0, 其平均去除率达 95.8%; 当 C/N 为 5 时, 运行 1 d 以后,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  去除率稳定在 99.2%, 出水浓度趋近于 0; 但当 C/N 为 3.3, 进水 TN 约为 90 mg/L 时, 反应器对氨氮的去除率仅为 80.0%, 出水平均浓度为 18.34 mg/L. 上述结果表明, 进水 C/N 是影响 SBBR 脱氮的重要影响因素. 在整个实验过程中, 系统稳定后, C/N 为 10、5、3.3 时, TN 平均去除率分别达到 90.7%、81.1%、58.3%, 说明系统中发生了反硝化, 而且, C/N 越高, 缺氧反硝化率越高, 这种对应关系与罗固源<sup>[22]</sup>等的发现一致.

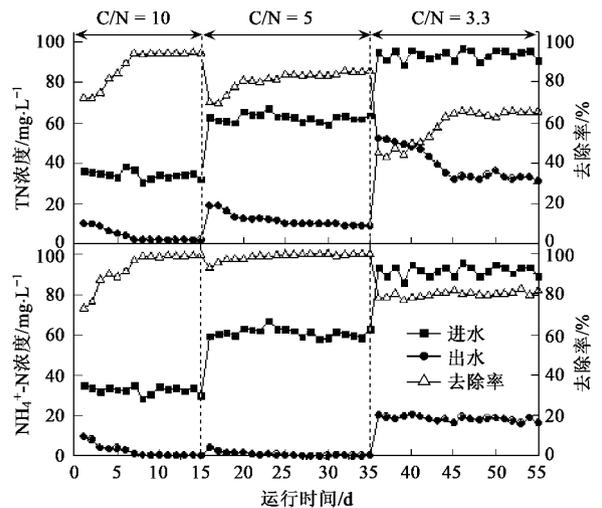


图 3 对不同 C/N 城市污水 TN、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除效果

Fig. 3 Effects of TN and  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  removal on municipal wastewater of different C/N ratios

## 2.2 总反应周期内 C、N、P 的变化规律

### 2.2.1 总反应周期内的曝气、停止曝气时间

实验中, 设置控制软件的低限  $\text{DO} = 0.5 \text{ mg/L}$ . 一个总反应周期包括一个计算阶段和数个反应周期. 以 C/N 为 5 时的一个总反应周期为例, 说明智能化控制 SBBR 的运行方式和 C、N、P 的变化规律. 反应器进水结束时, 启动智能化控制系统, 系统进入计算阶段, 曝气 30 min 后, 系统内  $\text{DO} > 0.5 \text{ mg/L}$ , 停止曝气, 缺氧回流 30 min 后,  $\text{DO} < 0.5 \text{ mg/L}$ , 在此计算过程内, 控制软件根据计算原理, 计算出反应阶段的好氧缺氧时间, 即第一个反应周期的曝气时间  $t_1 = 90 \text{ min}$ , 缺氧时间  $t_2 = 30 \text{ min}$ , 一个反应周期内  $t_1 + t_2 = 120 \text{ min}$ . 根据每一反应周期内 DO 的升降斜率, 再计算出下一反应周期的  $t_1$  和  $t_2$  值. 如图 4 所示, 是该例中总反应周期内的曝气、停止曝气的时

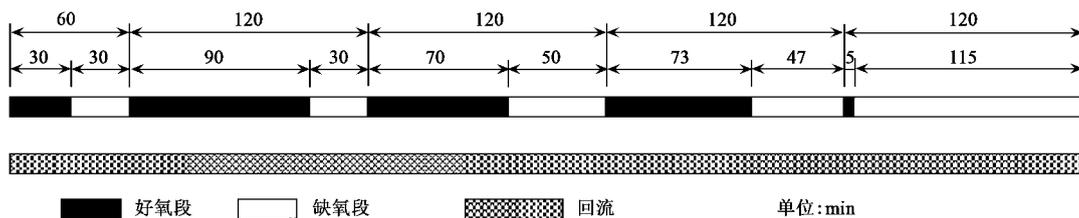


图4 总反应周期内的曝停时间和回流时间

Fig. 4 Aeration, cessation of aeration and backflow time in reaction period

间,本阶段实验在冬季进行,因此采用循环泵全周期回流以通过恒温水浴槽控制水温为  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

总反应周期内保持温度为  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ , DO 浓度变化表现出很好的规律性(如图5)。DO 浓度在好氧段逐渐增加,缺氧段逐渐降低至  $0.5\text{ mg/L}$ ,呈周期性的变化,当污染物浓度趋于最小值时,好氧段 DO 值达到  $7.0\text{ mg/L}$ 。

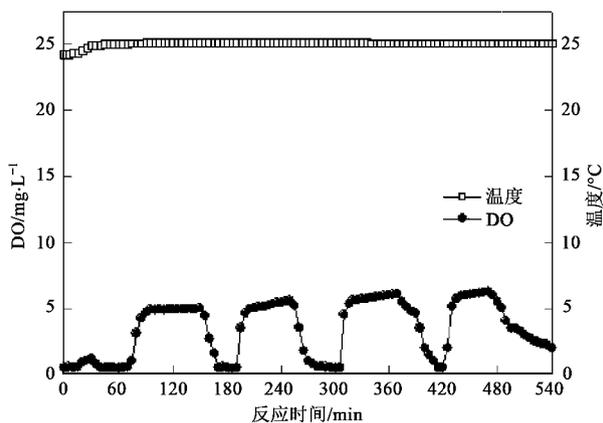


图5 总反应周期内 DO 浓度、温度的变化

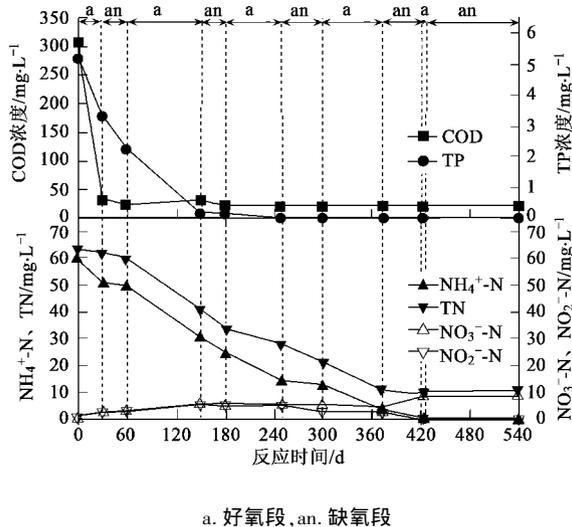
Fig. 5 Variation of DO and temperature

### 2.2.2 COD 浓度的变化规律

如图6所示,总反应周期内,COD 由进水时的  $309.5\text{ mg/L}$ ,好氧  $30\text{ min}$  后降为  $31.74\text{ mg/L}$ ,浓度减少量为进水的  $89.74\%$ 。COD 的减少量,部分是由于计算段好氧  $30\text{ min}$  的降解,但更主要的是由于初期吸附作用,其中以前  $30\text{ min}$  内的吸附作用最为显著。吸附的碳源储存在生物膜内部,可作为吸磷和反硝化脱氮的碳源。接下来,在厌氧  $30\text{ min}$  后,COD 降为  $23.81\text{ mg/L}$ 。在第一个反应周期内,好氧  $90\text{ min}$  后,COD 为  $31.74\text{ mg/L}$ ,略有升高,更说明最初  $30\text{ min}$  的减少量主要是初期吸附量。该反应周期厌氧段之后 COD 几乎降为最低,即 COD 的降解需要  $180\text{ min}$ 。

### 2.2.3 TP 浓度的变化规律

总反应周期内,TP 的变化规律不同于强化生物



a. 好氧段, an. 缺氧段

图6 总反应周期内的 C、N、P 的变化规律

Fig. 6 Variation of C, N and P in reaction period

除磷(EBPR)的 TP 的变化规律。反应的开始首先进入计算段:好氧曝气( $30\text{ min}$ ),缺氧( $30\text{ min}$ )。即反应的开始没有厌氧释磷段。如图6所示,计算段好氧的  $30\text{ min}$  内,TP 的去除效果非常显著,由进水的  $5.16\text{ mg/L}$  降为  $3.26\text{ mg/L}$ ,TP 的去除率达到  $36.8\%$ ,该阶段 TP 的去除可能是聚磷菌(PAOs)好氧吸磷所致。之后  $30\text{ min}$  厌氧段,不但没有释磷现象,反而有显著的吸磷现象,可能是反硝化聚磷菌在缺氧段反硝化吸磷的结果。在计算阶段结束之后的第一个反应周期,好氧段吸磷仍非常显著,由  $2.25\text{ mg/L}$  降为  $0.18\text{ mg/L}$ ,该反应周期的厌氧段降为  $0.16\text{ mg/L}$ 。而后,在第2个反应周期的好氧段,TP 浓度降为  $0$ 。由反应开始到 TP 浓度降为  $0$ ,所需的反应时间为  $240\text{ min}$ 。在整个总反应周期内,尽管任何一个厌氧段都没有厌氧释磷现象的发生,智能化控制 SBBR 却能有显著的吸磷效果。该实验 TP 浓度的变化规律不同于传统的生物除磷理论,TP 的去除率却有  $100\%$ 。而且,如前所述,C/N 约为  $10/5/3.3$  时,TP 的平均去除率分别达到  $94.1\%$ 、 $95.9\%$ 、

96.7%, TP 的去除率高且非常稳定. 由此可以说明, 微生物过量吸磷时, 反应周期开始时的厌氧段并不是必须的<sup>[15,16]</sup>. 这一发现与传统的厌氧释磷好氧吸磷理论明显不同.

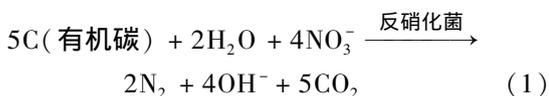
#### 2.2.4 N 浓度的变化规律

如图 6 所示, 总反应周期内, 不同形态氮的变化呈现出明显的规律性.

$\text{NH}_4^+$ -N 浓度在好氧段内降低较快, 其原因可能是  $\text{NH}_4^+$ -N 的降解需要消耗氧, 由氧作为电子受体. 而在缺氧段内, 浓度的降低有快有慢 (150~180 min, 373~420 min 较快, 30~60 min, 250~300 min 较慢), 出现这一现象的原因可能与采用智能化控制系统有关. 在该系统中, 低限 DO 值设定为 0.5 mg/L, 缺氧段前为好氧段, 若好氧段时间较长, 好氧段结束时反应器内的余氧量较多, 有大量的氧可作为电子受体,  $\text{NH}_4^+$ -N 降解较快, 反之较慢.  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度在 420 min 降为最低 (0.27 mg/L), 延长反应时间, 浓度略有升高.

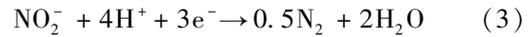
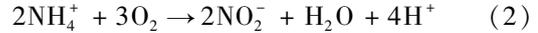
TN 浓度在计算段内下降得较为缓慢, 在反应周期内 TN 浓度逐渐降低, 与  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度的变化趋势一致.

在传统的 SBBR 反应器中,  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度在好氧段升高, 在厌氧段应浓度降低. 而在本次实验采用的自动控制 SBBR 反应器中, 好氧段  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度降低、厌氧段浓度升高等不同传统 SBBR 反应器的现象均不同程度地存在, 这些现象的存在应该与智能化控制系统独特的运行方式有关. 低限 DO 值设定为 0.5 mg/L, 即使在缺氧段, 反应器中的 DO 也不低于 0.5 mg/L, 所以缺氧段内会出现浓度升高. 而在好氧段内, 因为混纺棉线载体生物膜生长良好, 生物膜内部存在着缺氧微环境. 在反应初期生物膜吸附储存碳源, 反硝化细菌在缺氧条件下利用生物膜储存的碳源作为能量来源, 将  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NO}_2^-$  转化为  $\text{N}_2$  逸出,  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度降低 (如式 1). 但当反应进行到 373 min 后, 即在  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度几乎降低到最小时, 反应器中 DO 浓度较高,  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度升高得较快.



$\text{NO}_2^-$ -N 浓度在反应 180 min 之前, 逐渐升高, 由进水的 0.05 mg/L, 升高到 5.40 mg/L, 之后又逐渐降低到反应结束时的 0.01 mg/L.  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度的峰值 (5.40 mg/L) 较高, 说明反应器中存在着  $\text{NO}_2^-$ -N 的积累, 发生了短程硝化反硝化. 这是由于智能化控

制 SBBR 中, 既有适合硝化菌和亚硝化菌生长的好氧微生态环境, 也有适合反硝化菌和厌氧氨氧化细菌生长的厌氧微生态环境. 缺氧阶段, 依靠氧气作为电子受体的硝化菌和亚硝化菌活性受到抑制, 反硝化细菌和厌氧氨氧化细菌成为主要的活性菌群, 从而实现  $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{N}_2$  (如式 2 和 3).



$\text{NH}_4^+$ -N 浓度、TN 浓度为最小值对应的反应时间为 420 min, 若反应时间 > 420 min, 所对应的  $\text{NH}_4^+$ -N 略有升高, 而 TN 基本不变. 所以, 反应周期内的脱氮时间确定为 420 min.

#### 2.2.5 总反应周期内反应时间的确定

基于上述分析, 当进水 C/N 为 5 时, 进水 COD 为 300 mg/L, TN 为 90 mg/L, TP 为 5.16 mg/L 时, COD 降解到最小值需要 180 min, TP 浓度降为 0 所需要的时间为 240 min, 脱氮需要的时间为 420 min, 取其最大值, 所以, 总反应周期内反应时间为 420 min. 在 420 min 的总反应周期内, 曝气时间为 263 min, 停止曝气时间为 157 min. 曝气时间较短, 能够有效减少动力消耗, 达到节能目的.

### 3 结论

(1) 智能化控制 SBBR 独特的运行方式能够在单一的反应器中按照时间顺序形成交替运行的好氧-缺氧环境, 高效地去除有机物、氮、磷; 当 C/N 为 10、5、3.3 时, 对有机物的平均去除率分别达到 85.2%、91.1%、97.7%; 对  $\text{NH}_4^+$ -N 的平均去除率分别达到 95.8%、99.2%、80.0%; TN 平均去除率分别达到 90.7%、81.1%、58.3%; 对磷的平均去除率分别达到 94.1%、95.9%、96.7%. C/N 比对氮的去除影响较大, 随着 C/N 降低, TN 的去除率降低, 有机物和磷的去除率反而略有升高.

(2) 智能化控制 SBBR 中存在着同步硝化反硝化和短程硝化反硝化.

(3) 智能化控制 SBBR 在进水后未经厌氧释磷, 直接以好氧-缺氧方式运行, 具有高效的除磷效果, 和传统的厌氧释磷好氧吸磷理论和研究不同.

参考文献:

- [1] Di Iaconi C, Lopez A, Ramadori R, *et al.* Combined chemical and biological degradation of tannery wastewater by a periodic submerged filter (SBBR) [J]. *Water Research*, 2002, 36(9): 2205-2214.
- [2] Di Iaconi C, Lopez A, Ramadori R, *et al.* Tannery wastewater treatment by Sequencing batch biofilm reactor [J]. *Environmental*

- Science & Technology,2003,**37**(14): 3199-3205.
- [ 3 ] Kim D, Jung N, Park Y. Characteristics of nitrogen and phosphorus removal in SBR and SBBR with different ammonium loading rates[J]. Korean Journal of Chemical Engineering,2008,**25**(4): 793-800.
- [ 4 ] 荣宏伟,彭永臻,张朝升,等.曝气量对 SBBR 生物除磷的影响研究[J].中国给水排水,2008,**24**(05): 72-76.
- [ 5 ] 徐峥勇,杨朝晖,曾光明,等.序批式生物膜反应器(SBBR)处理高氨氮渗滤液的脱氮机理研究[J].环境科学学报,2006,**26**(1): 55-60.
- [ 6 ] Chiou R H, Yang Y R. An evaluation of the phosphorus storage capacity of an anaerobic/aerobic sequential batch biofilm reactor [J]. Bioresource Technology,2008,**99**(10): 4408-4413.
- [ 7 ] Di Iaconi C, Bonemazzi F, Lopez A, *et al.* Integration of chemical and biological oxidation in a SBBR for tannery wastewater treatment[J]. Water Science and Technology, 2004, **50**(10): 107-114.
- [ 8 ] White D M, Schnabel W. Treatment of cyanide waste in a sequencing batch biofilm reactor [J]. Water Research, 1998, **32**(1): 254-257.
- [ 9 ] Zhou J, Li Z G, Long T R, *et al.* Treatment of landfill leachates with high ammonia concentrations in two-stage sequential batch biofilm reactor [J]. Journal of Central South University of Technology,2007,**14**: 375-379.
- [10] Spagni A, Lavagnolo M C, Scarpa C, *et al.* Nitrogen removal optimization in a sequencing batch reactor treating sanitary landfill leachate[J]. Journal of Environmental Science and Health Part A-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering,2007, **42**(6): 757-765.
- [11] Sirianuntapiboon S, Suriyakit Y. Application of a new type of moving bio-film in aerobic sequencing batch reactor (aerobic-SBR) [J]. Journal of Environmental Management, 2006, **78**(2006): 149-156.
- [12] Li J, Peng Y, Gu G, *et al.* Factors affecting simultaneous nitrification and denitrification in an SBBR treating domestic wastewater[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering in China,2007,**1**(2): 246-250.
- [13] Gieseke A, Amnz P, Amann R, *et al.* Simultaneous P and N removal in a sequencing batch biofilm reactor: insights from reactor- and microscale investigations[J]. Water Research,2002, **36**(2): 501-509.
- [14] Zou H, Du G, Ruan W, *et al.* Role of nitrate in biological phosphorus removal in a sequencing batch reactor [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2006, **22**(7): 701-706.
- [15] 陈光秀,袁林江,韩玮.生物脱氮系统中无厌氧释磷的生物除磷工艺[J].环境科学学报,2008,**28**(9): 1800-1806.
- [16] 王冬波,李小明,杨麒,等. SBR 无厌氧段实现生物除磷[J].环境科学,2008,**29**(7): 1867-1873.
- [17] 李军,彭永臻,顾国维,等.城市污水脱氮除磷 SBR 在线控制系统研究[J].给水排水,2006,**32**(9): 90-93.
- [18] Spagni A, Marsili-Libelli S. Nitrogen removal via nitrite in a sequencing batch reactor treating sanitary landfill leachate [J]. Bioresource Technology,2009,**100**(2): 609-614.
- [19] 李军,彭永臻,顾国维,等.无外加碳源 SBBR 脱氮工艺及其控制方法研究[J].中国给水排水,2006,**22**(7): 17-21.
- [20] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].(第四版).北京:中国环境科学出版社,2002.
- [21] Stall T R, Sherrard J H. Effect of wastewater composition and cell residence time on phosphorus removal in activated sludge. Journal [J]. Water Pollution Control Federation, 1976, **48**: 307-322.
- [22] 罗国源,杨洋,许晓毅,等.进水碳氮比对 SUFR 系统脱氮除磷影响的特性分析 [J]. 环境工程学报, 2009, **3**(10): 1741-1745.