

# 新型填料床-逐级曝气池一体化反应器水处理技术\*

刘新\*\* 梁怀亮 施园 周川 许斌斌

(南京林业大学, 南京, 210037)

**摘要** 为解决低浓度污水处理工艺脱氮除磷过程中存在的微生物碳源不足的问题, 本文研制了新型填料床-逐级曝气串联反应器. 填料床分别采用珊瑚砂、竹炭颗粒、钢渣为填料, 在好氧、厌氧兼顾的环境下, 实现化学除磷、生物除氮. 试验采用模拟生活污水, COD、TN、TP、氨氮的浓度为  $170\text{--}190\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $27\text{--}30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $8\text{--}10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $23\text{--}25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 反应器在第27天启动成功, 100 d 稳定运行结果显示, 当 HRT 为 14 h, 曝气池 DO 为  $3.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 反应器处理效果良好, 出水中 COD、TN、TP、氨氮的浓度分别为  $30.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $5.59\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $4.67\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918—2002)中的一级 B 排放标准. 经钢渣填料床处理后的污水, TP 浓度降到  $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右, 在不排泥的情况下, 实现 TP 的高效去除, 同时有效避免了除磷与脱氮过程对碳源的竞争, 实现了生物法对水体中富余氮、磷的高效去除.

**关键词** 珊瑚砂, 竹炭, 钢渣, 一体化反应器, 脱氮除磷.

有效去除污水中的氮磷是解决水体富营养化的关键, 传统的生物除磷主要是靠聚磷菌在厌氧条件下释磷, 然后在好氧条件下将污水中的磷酸盐以聚磷的形式储存在体内, 在曝气结束时排除剩余的富磷污泥来实现<sup>[1]</sup>. 因此, 生物除磷需要严格的厌氧环境, 并且剩余污泥的处置会大大增加工艺的成本.

生物法除磷和脱氮过程存在着对有机碳源的竞争, 我国的城市生活水平较低, 生活污水的 C/N 低, 脱氮除磷过程中有机碳源的不足, 会进一步加重除磷和脱氮对有机碳源的竞争, 导致脱氮除磷效果同时低下<sup>[2]</sup>. 开发可高效脱氮除磷同时剩余污泥产量低的工艺, 成为迫切需要<sup>[3]</sup>.

为此, 本试验设计了一种新型填料床-逐级曝气串联反应器, 充分利用具有良好微生物亲合性、钢渣化学除磷迅速的特点, 以及珊瑚砂、竹炭填料, 对模拟低 C/N 的城市生活污水的氮、磷、有机物的去除效果, 以及剩余污泥的发生率进行了研究, 为城市污水和经济不发达的城镇以及农村生活污水的高效低耗处理工程设计及改造提供有益的参考.

## 1 实验部分

### 1.1 反应装置

反应装置如图 1 所示, 一体化反应器为有机玻璃结构, 长×宽×高为  $1.6\text{ m}\times 0.2\text{ m}\times 0.25\text{ m}$ , 整个装置分为 8 格, 每格长×宽×高为  $0.2\text{ m}\times 0.2\text{ m}\times 0.25\text{ m}$ , 有效水深  $0.20\text{ m}$ , 污水由蠕动泵打入, 依次经过初沉池, 珊瑚砂填料床, 曝气增氧池, 竹炭颗粒填料床, 曝气增氧池, 钢渣填料床, 曝气增氧池, 二沉池处理后排出, 固定床填料有效填充高度为  $0.2\text{ m}$ , 水力停留时间 (HRT) 为  $2.5\text{ h}$ , 曝气增氧池 DO 为  $3.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 温度控制在  $18\text{ }^{\circ}\text{C}\text{--}22\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 在初沉池中部, 距离底部  $0.1\text{ m}$  处设取样点 1, 珊瑚砂固定床距离底部  $0.05\text{ m}$  处设取样点 2, 一级曝气池距离底部  $0.1\text{ m}$  处设取样点 3, 竹炭固定床距离底部  $0.05\text{ m}$  处设取样点 4, 二级曝气池距离底部  $0.1\text{ m}$  处设取样点 5, 三级曝气池距离底部  $0.1\text{ m}$  处设取样点 6, 二沉池距离底部  $0.1\text{ m}$  处设取样点 7.

### 1.2 填料

珊瑚砂: 不规则形状, pH 值为  $7.0\text{--}8.5$ , 含有丰富的空隙结构, 具有良好的微生物亲合性, 填充高度为  $0.2\text{ m}$ , 填充体积为  $0.008\text{ cm}^3$ .

2012 年 2 月 7 日收稿.

\* 江苏省科技厅社会发展项目 (BE2011839); PAPD 资助.

\*\* 通讯联系人, E-mail: xin126mail@126.com; 电话: 13512502106

竹炭:颗粒状结构,粒径 0.3 cm,产自浙江安吉,经 1100 °C 高温炭化,比表面积为  $450 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ,空隙结构丰富,孔隙率分布合理,具有良好的微生物亲合性,填充高度为 0.2 m,填充体积为  $0.008 \text{ cm}^3$ .

钢渣:颗粒状结构,粒径 0.01 cm,主要由钙、铁、硅、镁和少量铝、锰、磷等的氧化物组成,填充高度为 0.2 m,填充体积为  $0.008 \text{ cm}^3$ .

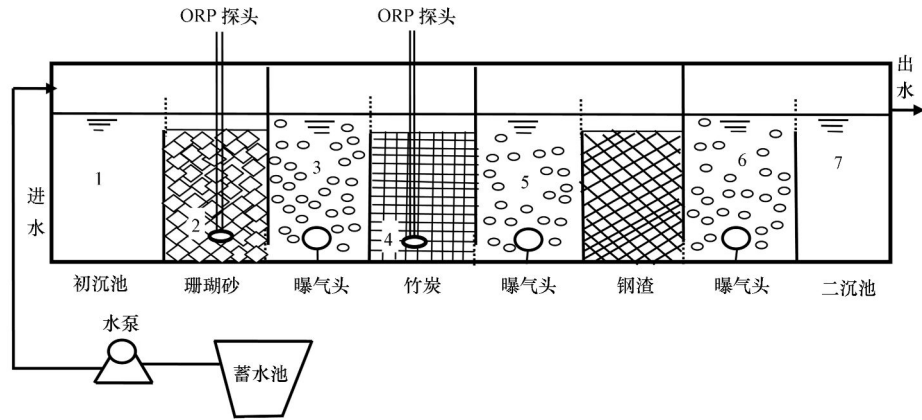


图 1 工艺流程图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

### 1.3 实验污水及启动

实验采用人工合成模拟生活污水,pH 值为 6.7—7.5,水质如表 1 所示.

表 1 模拟生活污水水质

Table 1 Simulation of sewage water quality

	COD	TN	氨氮	TP
浓度/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	180—200	28—32	24—26	5—10

珊瑚砂、竹炭颗粒、钢渣采用南京林业大学紫湖溪污水浸泡 15 d,自然挂膜,装置在第 16 天开始连续进水,曝气,运行 14 d 后,珊瑚砂填料床,竹炭颗粒填料床的表面出现乳白色生物膜,分别对珊瑚砂、竹炭颗粒取样镜检,发现游泳型纤毛虫,轮虫等微生物,出水 COD 的去除率达到 70% 左右,反应器启动成功,每隔 2 d 分别取 1、2、3、4、5、6、7 水样进行水质分析.

### 1.4 分析测试项目

COD<sub>Mn</sub>、TN、TP、NH<sub>3</sub>-N 按国标方法检测<sup>[4]</sup>,pH、ORP 采用 SHKY 便捷型测量仪测定.

## 2 结果与讨论

### 2.1 COD 的去除

在连续运行的 100 d 内,连续监测了一体化反应器 1、2、3、4、5、6、7 取样口的水质指标,pH、ORP 变化如图 2 所示,污水进入初沉池后,pH 值为 6.1—6.3,ORP 初始为 10 mV 左右,在第 60 天,取样点 1 的 ORP 值降到 -10 mV 以下,而 pH 值也明显降低,水体出现恶臭气味,这证明初沉池发生了厌氧酸化反应.取样点 2、3、4、5、6、7 的 ORP 值分别为 90、10、80、130、130 mV 左右,证明一体化反应器的珊瑚砂填料床、一级曝气池、竹炭颗粒填料床、二级曝气池、三级曝气池、二沉池分别处于厌氧、好氧、厌氧、好氧、好氧、好氧状态.

一体化反应器对 COD 的去除效果如图 3 所示,反应器对 COD 的平均去除率达到 83.2%,出水中 COD 平均浓度为  $30.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918—2002)中的一级 A 排放标准.由图 4 可知,一体化反应器中的珊瑚砂填料床、竹炭颗粒填料床对 COD 有一定的去除效果,这与珊瑚砂、竹炭颗粒具有较大的比表面积和良好的微生物亲合性有关.一级、二级、三级曝气池对污水中的 COD 具有较高的去除效果,曝气池微生物总量较大,肉眼能够看到曝气池中有大量的絮状物存在,

经镜检后发现,微生物种类较多,曝气池中含有丰富的氧和有机物,适合好氧微生物生存,高效分解利用有机物<sup>[5]</sup>,实现对 COD 的高效去除.

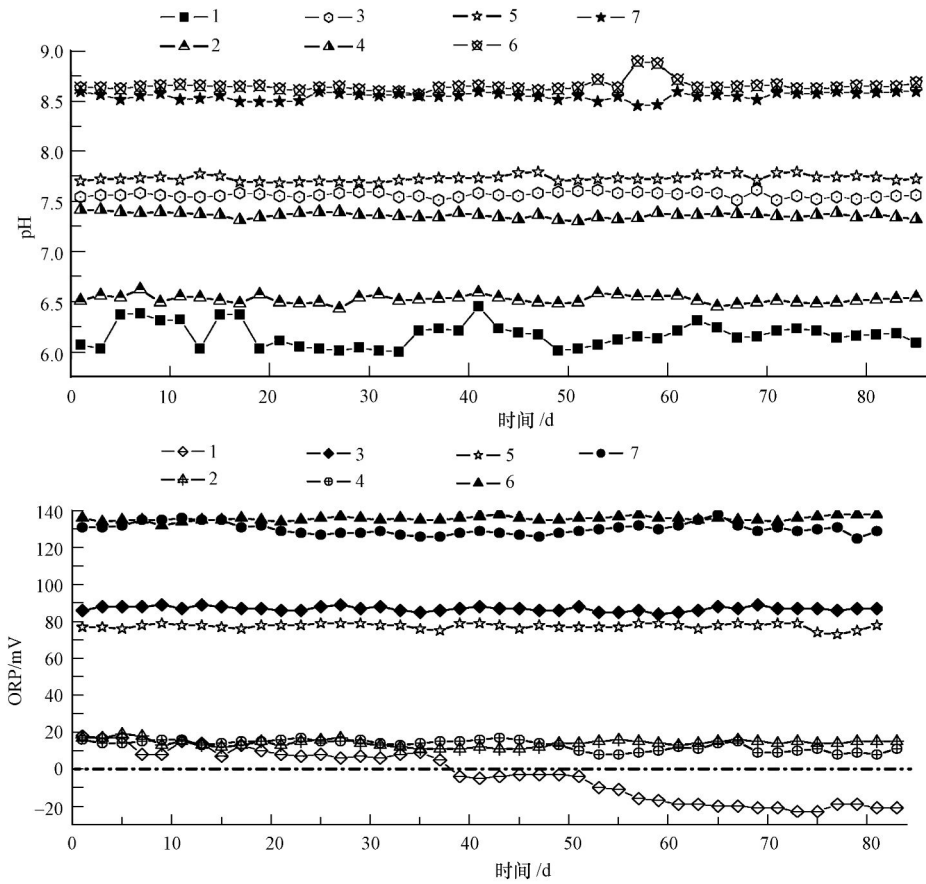


图 2 pH 和 ORP 的变化

Fig. 2 Variation of pH and ORP with operation time

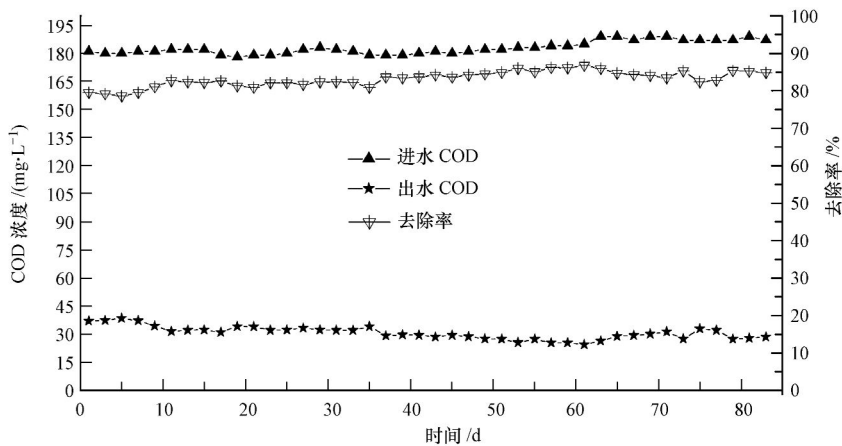


图 3 COD 的去除效果

Fig. 3 COD removal efficiency with operation time

### 2.2 TP 的去除

一体化反应器对 TP 的去除效果如图 5 所示,反应器对 TP 的平均去除率为 89.1%,出水中的 TP 平均浓度为 1.0 mg·L<sup>-1</sup>,达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918—2002)中的一级 B 排放标准.由图 6 可知,一体化反应器对 TP 的去除主要发生在钢渣固定床部分,由于一体化反应器没有严格的厌氧段(图 1),污水进入反应器后,TP 的浓度没有发生明显的变化,没有出现聚磷菌吸磷、释磷现象,而

经过钢渣固定床后,TP 浓度下降明显,这是由于钢渣含有丰富的 Ca 盐和 Fe 盐<sup>[6]</sup>,污水中磷与 Ca 盐和 Fe 盐发生高效的化学反应,高效地去除 TP<sup>[7]</sup>,并实现剩余污泥的低排放率,避免了脱氮生化过程发生碳源的竞争,提高一体化反应器的高去除效果和运行稳定性<sup>[8]</sup>.

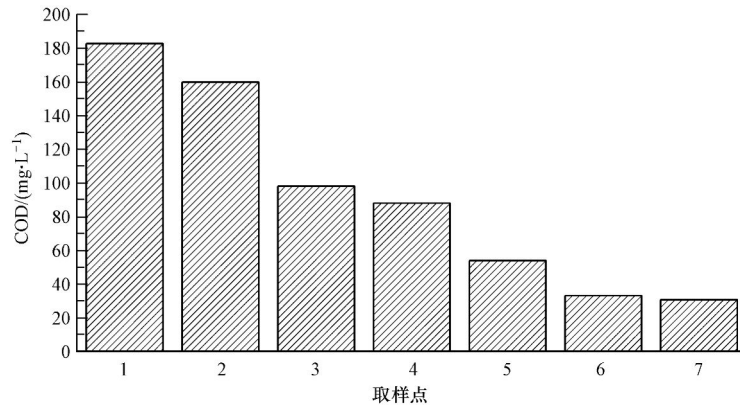


图 4 COD 沿程变化

Fig. 4 Variation of COD removal efficiency with operation stages

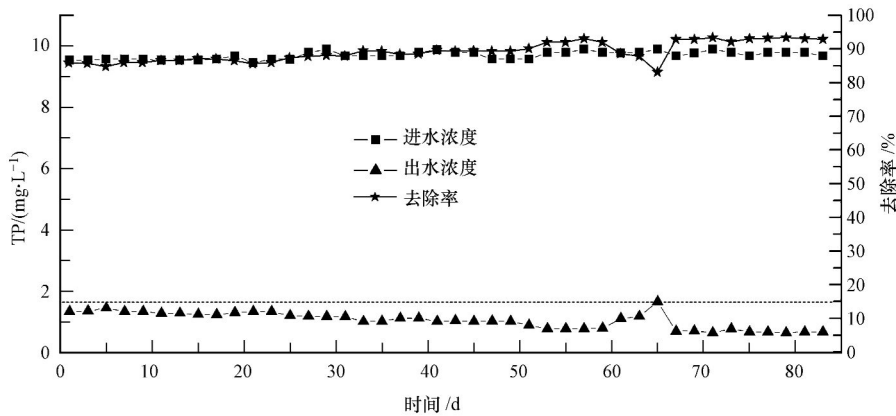


图 5 TP 的去除效果

Fig. 5 Variation of TP removal efficiency with operation time

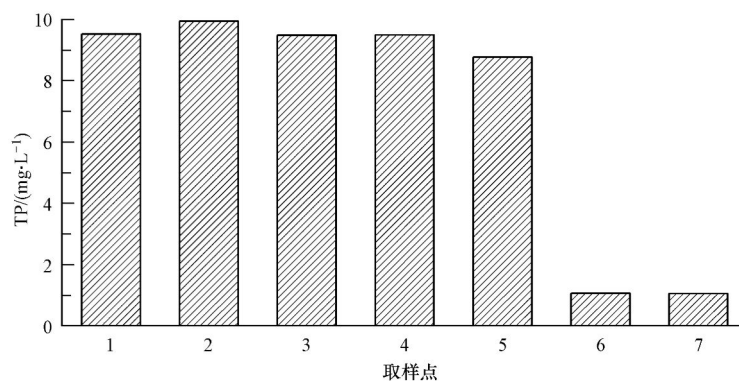


图 6 TP 沿程变化

Fig. 6 Variation of TP removal efficiency with operation stages

### 2.3 TN 的去除

一体化反应器对 TN 的去除效果如图 7 所示, TN 的平均去除率为 86.3%, 出水的 TN 平均浓度为  $5.59 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918—2002)中的一级 A 排放标准, 在装置运行初期, 出水中的 TN 浓度偏高, 随着稳定运行时间的延长, 一体化反应器中生长世代周期较长的全

程硝化反硝化菌积累<sup>[9-11]</sup>,浓度加大,对 TN 的去除率影响不大,出水中的 TN 浓度也略有下降,由图 8 可知,一体化反应器的珊瑚砂填料床、竹炭颗粒填料床、曝气池对 TN 都有一定的去除效果,这是由于系统对 TP 的去除全部发生在钢渣填料床,由化学沉淀去除,不会与脱氮过程竞争碳源<sup>[12-13]</sup>,使得全程硝化反硝化过程有足够的碳源,再加上填料床,曝气池足够长的水力停留时间,有利于全程硝化反硝化菌的生长与积累<sup>[14]</sup>,提高了系统对 TN 的去除率。

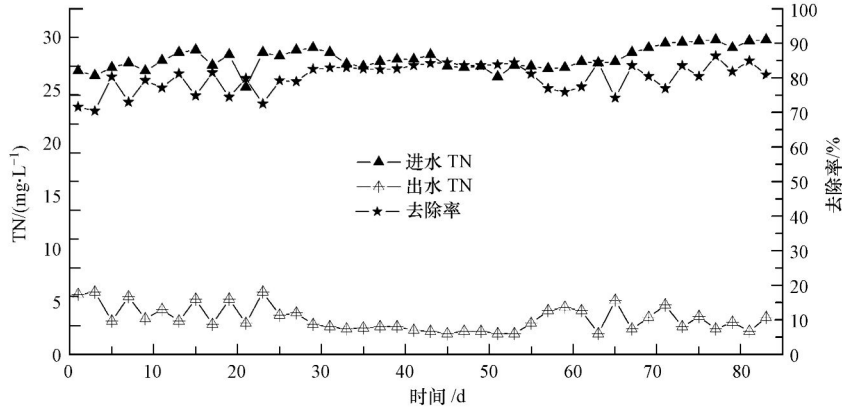


图 7 TN 的去除效果

Fig. 7 Variation of TN removal efficiency with operation time

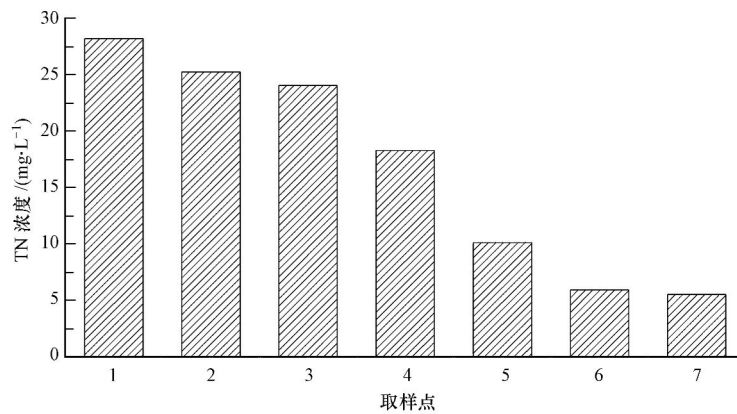


图 8 TN 的沿程变化图

Fig. 8 Variation of COD removal efficiency with operation stages

### 2.4 氨氮的去除

一体化反应器对氨氮的去除效果如图 9 所示,系统对氨氮的平均去除率达到 81.7%,出水中的氨氮平均浓度为 4.67 mg·L<sup>-1</sup>,随着系统的稳定运行,氨氮的去除率逐渐提高。

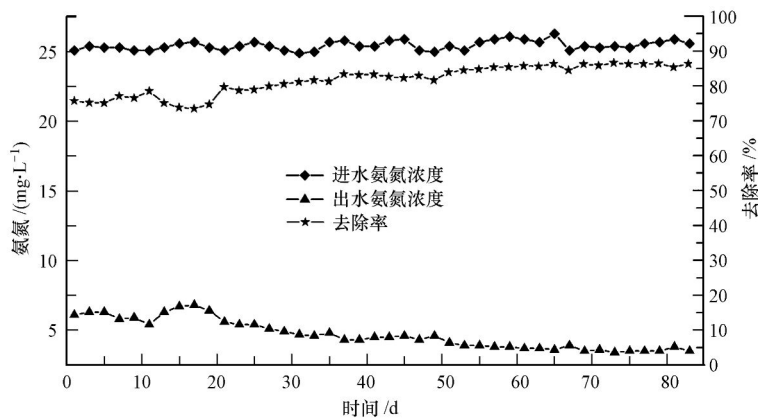


图 9 氨氮的去除效果

Fig. 9 Variation of NH<sub>3</sub>-N removal efficiency with operation time

由图 10 可知,一体化反应器中的珊瑚砂填料床,竹炭颗粒填料床对氨氮有一定的去除效果,这是因为珊瑚砂、竹炭颗粒具有良好的微生物亲合性<sup>[15]</sup>,适于硝化细菌的附着生长<sup>[16]</sup>.曝气池中的氨氮去除效果较好,这与曝气池有利于硝化细菌的生长有关,而且曝气池的温度为 22 ℃—24 ℃,pH 值为 8.2—8.5(图 1),为碱性环境,有利于高浓度氧气对污水中的氨氮有效吹脱.填料床与曝气池的协同作用,使得一体化反应器具有较高的氨氮去除率.

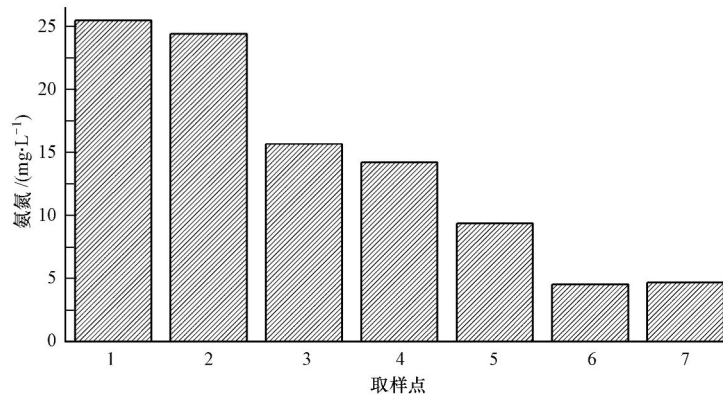


图 10 氨氮的沿程变化

Fig. 10 Variation of NH<sub>3</sub>-N removal efficiency with operation stages

### 3 结论

(1) 逐级曝气-新型填料床串联反应器对 COD、TN、TP,氨氮的去除率分别达到 83.2%、86.3%、89.1%、81.7%. 出水中 COD、TN、TP,氨氮的浓度分别为 30.7 mg·L<sup>-1</sup>、5.59 mg·L<sup>-1</sup>、1.0 mg·L<sup>-1</sup>、4.67 mg·L<sup>-1</sup>,达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918—2002)中的一级 B 排放标准.

(2) 钢渣与污水中的 TP 充分发生化学沉淀反应,在零排泥的情况下,实现了对 TP 的高效去除,同时有效地解决了除磷与脱氮过程对碳源的竞争,在一体化反应器中同步实现了对氮、磷的高效去除,钢渣在 100 d 的运行期内没有出现饱和情况.随着试验的进行,钢渣床有可能出现的饱和情况有待进一步研究.

(3) 新型填料床-逐级曝气串联反应器采用珊瑚砂、竹炭颗粒、钢渣为填料床填料,充分利用珊瑚砂廉价易得、微生物亲合性好,竹炭颗粒内表面积较大、具有良好的微生物亲合性,钢渣具有的高效除磷性能等特点,有效去除污水中的氮磷、有机物,实现了“以废制废”.

### 参 考 文 献

- [1] Westerman P W, Bicudo J R, Kantardjieff A. Upflow bio-logical aerated filters for the treatment of flushed swine manure[J]. *Bioresour Technol*, 2000, 74(3): 181-191
- [2] Patel A, Zhu J, Nakhla G. Simultaneous carbon, nitrogen and phosphorous removal from municipal wastewater in a circulating fluidized bed bioreactor[J]. *Chemosphere*, 2006, 65(7): 1103-1112
- [3] Liu Y, Tay J H. Strategy for minimization of excess sludge production from the activated sludge process [J]. *Biotechnology Advances*, 2001, 19(2): 97-107
- [4] 国家环保局. 水和废水监测分析方法(第 4 册)[M]. 北京:中国环境科学出版社,2002
- [5] Yasutoshis S, Yu-Ichi O, Katsurshi U, et al. Filtration characteristics of hollow fiber microfiltration membranes used in membrane bioreactor for domestic wastewater treatment[J]. *Water Res*, 1996, 30(10): 2385-2392
- [6] Elisabeth V, Münch, Paul Lant, et al. Simultaneous nitrification and denitrification in bench-scale sequencing batch reactors[J]. *Water Sci Tech*, 1996, 30(2): 277-284, 1541
- [7] Asselin C, Chicoine K, Parisien A. Pilot testing and full-scale implementation of the low sludge production (LSP) process[J]. *PapPAER-CANADA*, 2005, 106(6): 32-35
- [8] Abbassi B, Dullstein S, Rabiger N. Minimization of excess sludge production by increase of oxygen concentration in activated sludge flocs; experimental and theoretical approach[J]. *Water Res*, 2000, 34(1): 139-146

- [ 9 ] Xiong J B, He Z L, Mahmood Q, et al. Phosphate removal from solution using steel slag through magnetic separation[J]. *J Hazard Mater*, 2008, 152 (1):211-215
- [10] Bashan L E, Bashan Y. Recent advances in removing phosphorus from wastewater and its future use as fertilizer (1997—2003)[J]. *Water Research*, 2004, 38 (19):4222-4246
- [11] Kim E H, Yim S B, Jung H C, et al. Hydroxyapatite crystallization from a highly concentrated phosphate solution using powdered converter slag as a seed material[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 136 (3):690-697
- [12] Xue Y J, Hou H B, Zhu S J. Characteristics and mechanisms of phosphate adsorption onto basic oxygen furnaceslag[J]. *J Hazard Mater*, 2009, 162 (2/3):973-980
- [13] Wang S Y, Tsai M H, Lo S F, et al. Effects of manufacturing conditions on the adsorption capacity of heavy metal ions by Makino bamboo charcoal[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99:7027-7033
- [14] Wu K H, Ting T H, Wang G P, et al. Synthesis and microwave electromagnetic characteristics of bamboo charcoal/polyaniline composites in 2-40GHz[J]. *Synth Met*, 2008, 158 (17/18):688-694
- [15] Zuo Songlin, Gao Shangyu, Yuan Xigen, et al. Carbonization mechanism of bamboo (phyllostachys) by means of fourier transform infrared and elemental analysis[J]. *Journal of Forestry Research*, 2003, 14(1):23-28
- [16] Davenport R J, Curtis T P, Goodfellow M, et al. Quantitative use of fluorescent in situ hybridization to examine relationships between mycolic acid-containing actinomycetes and foaming in activated sludge plants[J]. *Appl Environ Microbiol*, 2000, 66:1158-1166

## A new integrated reactor of fixed-bed and multi-aeration bed for waste water treatment

LIU Xin\*    LIANG Huailiang    SHI Yuan    ZHOU Chuan    XU Binbin

(Nanjing Forestry University, Nanjing, 210037, China)

### ABSTRACT

A new type of fixed-bed reactor contacted with aeration tank was developed to solve the insufficiency of carbon source in nitrogen and phosphorus removal process of general sewage water. Both in the aerobic and anaerobic environment, the chemical phosphorus and biological nitrogen could be removed in the packed bed (filler: coral sand, charcoal particles and steel slag). The contaminants in the simulated domestic wastewater had 170—190 mg·L<sup>-1</sup> COD, 27—30 mg·L<sup>-1</sup> TN, 810 mg·L<sup>-1</sup> TP and 23—25 mg·L<sup>-1</sup> NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N. The reactor started successfully in the twenty-seventh day. After running stably for 100 days, the results showed that when the HRT and DO in the aerated water were 14 h and 3.5 mg·L<sup>-1</sup> respectively, the reactor had good treatment effect. The concentration of COD, TN, TP and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N in the influent were 30.7 mg·L<sup>-1</sup>, 5.59 mg·L<sup>-1</sup>, 1.0 mg·L<sup>-1</sup>, and 4.67 mg·L<sup>-1</sup> respectively, achieving primary class B effluent standard of GB18918—2002. The concentration of TP in the sewage after the treatment of slag packed bed dropped to 1 mg·L<sup>-1</sup> approximately. TP in sludge could be effectively removed. Meanwhile, the competition for carbon source was avoided during the phosphorus and nitrogen removal process. The result was that surplus nitrogen and phosphorus was effectively removed from water.

**Keywords:** coral sand, bamboo charcoal, steel slag, integrative reactor, nitrogen and phosphorus removal.