

# Ways of Improved ICEAS Process to Improve the Efficiency of Nitrogen Removal in the Wastewater Treatment Plant

Jing Wang, Shuying Wang, Yan Sun, Yinxu Lu, Yongzhen Peng\*

State Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing  
Email: 1160234419@qq.com, \*pyz@bjut.edu.cn

Received: Mar. 17<sup>th</sup>, 2016; accepted: Apr. 15<sup>th</sup>, 2016; published: Apr. 20<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

In order to improve the total nitrogen removal rate, this paper studied the ways to improve the nitrogen removal efficiency through the improvement of ICEAS process, which was finally applied to the urban wastewater treatment plant. The results showed that the traditional ICEAS process limits the improvement of total nitrogen removal rate, and the step-feed ICEAS process always has a higher TN removal efficiency than the traditional ICEAS process. Operation mode consisted of 56 min agitation, 112 min aeration, 50 min precipitation, and 70 min decanting; when operation cycle was 4.8 h, the removal rate of total nitrogen could be significantly improved.

## Keywords

Intermittent Cyclic Extended Aeration System (ICEAS), Low COD/TN, Actual Domestic Wastewater, Total Nitrogen Removal Rate, Intermittent Influent

---

# 改良ICEAS工艺提高污水厂脱氮效率的方法研究

王 竞, 王淑莹, 孙 燕, 陆胤旭, 彭永臻\*

\*通讯作者。

北京工业大学, 北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京  
Email: 1160234419@qq.com, pyz@bjut.edu.cn

收稿日期: 2016年3月17日; 录用日期: 2016年4月15日; 发布日期: 2016年4月20日

## 摘要

为进一步提高ICEAS工艺污水处理厂的总氮去除率, 本文研究了如何通过对ICEAS工艺的改良提高其脱氮效率, 并最终应用于城镇污水处理厂ICEAS工艺高效脱氮升级改造。研究表明, 连续进水方式限制了总氮去除率的提高, 将连续进水方式变为间歇进水方式, 系统的脱氮效率明显提高。运行模式为搅拌56 min、曝气112 min、沉淀50 min、滗水70 min, 运行周期为4.8 h时, 可明显提高总氮的去除率。

## 关键词

ICEAS工艺, 低碳氮比, 实际生活污水, 总氮去除率, 间歇进水

## 1. 引言

滇池是云南省面积最大的高原湖泊, 有着“高原明珠”之称。1999年国务院就批准实施了《昆明市城市总体规划》, 用于切实保护和改善滇池的生态环境, 《云南省滇池保护条例》也于2013年1月1日起正式开始施行, 然而滇池的富营养化问题始终是滇池面临的最重要问题。根据2012年监测数据表明, 草海和外海(滇池分为草海和外海)水质类别均为劣五类, 草海综合营养状态指数为69.8, 外海综合营养状态指数为68.4, 营养状态均为中度富营养。

我国的污水排放标准越来越严格, 采用脱氮除磷工艺的城镇污水处理厂有95%都无法达到《城镇污水处理厂污染物排放标准(GB18918-2002)》中的一级A标准, 即使城镇污水处理厂出水达到了一级A的标准, 也与地表水四类标准有着较大的差距, 当总磷浓度超过0.1 mg/L (如果磷是限制因素)或总氮浓度超过0.3 mg/L (如果氮是限制因素)时, 水体就可能出现富营养化[1] [2], 进而引起藻类及其它浮游生物迅速繁殖, 水体溶氧量下降, 鱼类及其它生物大量死亡。因此尽可能的降低进入水体中的氮、磷浓度是缓解水体富营养化十分有效和必要的措施之一, 其中磷可以通过混凝沉淀等物理化学方法去除[3]-[5], 而要想通过物理方法去除污水中的氮素只能通过反渗透膜法[6], 然而极高的处理成本使得这种物理去除氮素的方法并不具有可行性, 而经济可行的方法只有通过生物法去除。目前针对实际污水高效脱氮特别低碳氮比污水的研究取得了巨大的进展, 主要技术有短程硝化-反硝化脱氮[7]、同步硝化反硝化脱氮[8] [9]、厌氧氨氧化(ANAMMOX)脱氮[10] [11]等, 然而这些技术研究基本还处在实验室小试或者中试阶段[12], 距离实际应用还很远, 所以在原有传统生物脱氮处理工艺基础上研究高效生物脱氮的策略与方法, 是我国污水处理厂升级改造面临的迫切问题。

ICEAS 全称为间歇式循环延时曝气活性污泥法, 是 SBR 工艺中最具代表性的变种工艺之一, 1976年美国建成世界上第一座 ICEAS 工艺污水处理厂, 随后在日本、美国、加拿大、澳大利亚等地得到广泛应用[13]。我国第一座 ICEAS 工艺污水处理厂昆明市第三水质净化厂于1994年建成, 处理规模为15万吨/天, 2007年8月昆明市第三水质净化厂二期建成, 设计处理能力6万吨/天, 至此处理能力达到21万吨/天, 本文围绕昆明第三水质净化厂运行现状开展高效脱氮的策略的研究, 为污水处理厂的高效脱氮升级改造提供理论支持。

## 2. ICEAS 工艺特征

图 1 为 ICEAS 反应池构造简图。反应池分为预反应区和主反应区。预反应区具有缓冲连续进水和生物选择的功能：污水从预反应区以很低的流速(一般为 3~5 cm/s)通过隔墙底部的过水孔进入主反应区，缓冲了进水对主反应区内泥水分离效果的影响；污水进入预反应区中与污泥接触，形成较高的污泥负荷，此时菌胶团细菌为优势菌，从而有效抑制丝状菌的生长进而防止污泥发生丝状膨胀[14]。

ICEAS 反应池内不存在严格的厌氧环境，聚磷菌是一类特殊的兼性细菌，在厌氧条件下，聚磷菌可以利用体内储存的能量，将外部的易生物降解有机碳源吸收进体内，储存碳源及能源，同时消耗体内的 ATP，将磷酸根释放到水体中；在好氧条件下，聚磷菌利用在厌氧阶段储存的碳源或能源进行新陈代谢，通过吸收外界磷酸根合成能源。在厌氧阶段吸收的碳源越多，在好氧阶段氧化分解产生的能量越多，从外界吸收的磷越多。所以 ICEAS 工艺的除磷功能特别弱，仅通过生物二级处理很难使磷达到较高的去除率，但磷可以通过深度处理系统添加化学药剂(PAM 和 PAC)经过混凝、沉淀去除，总之，磷的去除对污水处理厂来说并非难事。

ICEAS 反应池通过缺氧时段和好氧时段的交替运行具有脱氮的功能。以昆明第三水质净化厂为例，其运行模式为连续进水、间歇排水两段 A/O 式运行模式，每天运行 5 周期，每周期 4.8 小时，具体运行模式为：第一次搅拌 36 min、第一次曝气 56 min、第二次搅拌 20 min、第二次曝气 56 min、沉淀 50 min、滗水 70 min，如图 2。

通过以上运行模式，ICEAS 反应池可实现进水中总氮的去除，然而在城镇污水厂实际运行中发现出水总氮难以达到一级 A 标准，以昆明第三水质净化厂为例，主要有以下几个因素限制了总氮的去除。

1) 进水碳氮比较低，反硝化阶段碳源不足。进水碳氮比较低是我国城镇污水处理厂面临的共同问题，进水碳氮比(COD/TN)为 5 左右，进水 COD 范围为 250~350 mg/L，其中溶解性 COD 的浓度只有 100 mg/L 左右，污水进入 ICEAS 反应池后 COD 浓度由于稀释作用进一步降低，第一次搅拌阶段和第二次搅拌阶段的缺氧反硝化反应由于碳源的缺失进行的并不充分；

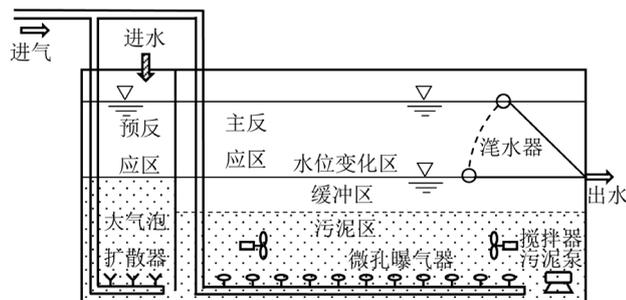


Figure 1. Schematic diagram of the ICEAS process

图 1. ICEAS 反应池构造简图

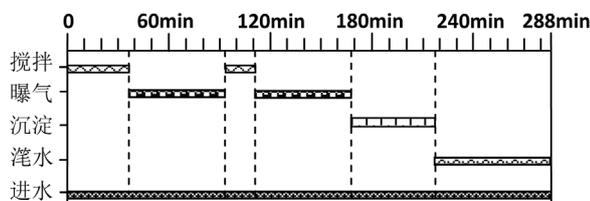


Figure 2. ICEAS process flow diagram of Kunming third sewage treatment plant

图 2. 昆明第三水质净化厂运行示意图

2) 两段 A/O 式运行模式没有发挥其应有作用。ICEAS 反应池反硝化主要发生在第一次搅拌阶段, 经过第一次曝气阶段好氧曝气后有机碳源 COD 浓度降到 40 mg/L 左右, 在第二次搅拌阶段缺氧搅拌时水中的碳源严重不足, 致使其反硝化功能基本丧失;

3) 连续进水方式使得进水中的碳源没有被高效利用。第一次曝气阶段和第二次曝气阶段好氧曝气时依然在进水, 此时进水中的有机碳源仅仅通过好氧曝气方式去除, 即原水中约 40% 的碳源在曝气阶段被氧化降解, 而并没有用作反硝化碳源, 这种连续进水的方式不仅使进水中的碳源利用率较低, 同时还增加曝气阶段系统的有机物负荷, 造成了不必要的能源浪费。

为解决以上存在的 ICEAS 工艺总氮去除率不高的问题, 对其展开 SBR 工艺小试装置实验研究, 重点研究高效脱氮策略, 将连续进水模式改为间歇进水模式, 同时将两段搅拌方式合为一段, 并且增加 A/O 比, 最终确定最佳运行模式, 为污水处理厂的高效脱氮升级改造提供理论支持。

### 3. 实验材料和方法

#### 3.1. 小试污泥和污水

SBR 小试用水取自昆明第三水质净化厂一期(老厂)一级配水渠道, 其水质特征为 COD (42.5~181.9) mg/L, BOD<sub>5</sub> (20.3~92.4) mg/L, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N (25.6~38.6) mg/L, NO<sub>3</sub>-N (0~0.52) mg/L, TN (27.4~39.6) mg/L, COD/TN (1.3~5.7)。该生活污水平均 COD/TN 为 2.9, 碳氮比较低; SBR 小试所用污泥直接取自昆明第三水质净化厂 ICEAS 池。

#### 3.2. SBR 小试装置

实验所用 SBR 小试试验装置由有机玻璃制成, 圆柱形, 高 36 cm, 直径 20 cm, 总有效容积 12 L, 如图 3 所示, 进水通过蠕动泵控制, 根据需要由加热棒来调节温度, 采用机械搅拌, 装置底部用粘砂块作为微孔曝气头, 由空气泵进行曝气。反应装置内设有 DO、pH 和 ORP 探头, 可以实时监测反应过程中的 DO、pH 和 ORP 值及其变化规律。

#### 3.3. 检验分析项目

试验检测项目及方法见表 1 所示, 测样前水样都经过滤纸过滤。

#### 3.4. 实验方案

SBR 小试实验装置分为 A、B 两组, 且在相同的污泥浓度(5000 mg/L 左右)和进水条件下同时运行。

A 组模拟目前昆明第三水质净化厂一期的运行模式, 具体如图 2 所示, 进水方式为连续进水, 每天运行 5 个周期, 每周期 4.8 小时;

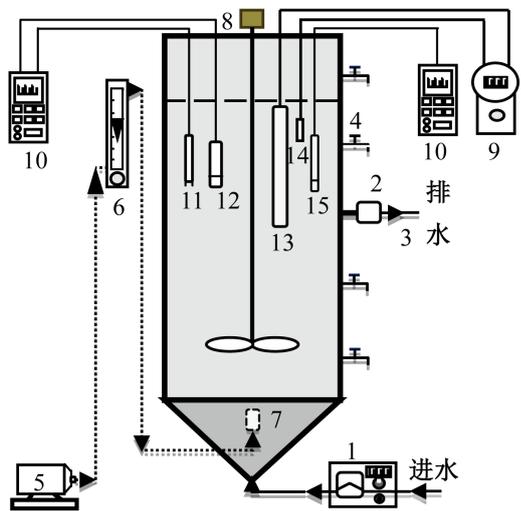
B 组模拟间歇进水运行模式, 具体如图 4 所示, 进水方式为间歇进水(沉淀、滗水、搅拌阶段进水而曝气阶段不进水), 每天运行 5 个周期, 每周期 4.8 小时, 具体运行周期分为二个阶段, 具体如表 2 所示。

## 4. 结果与讨论

### 4.1. COD 去除效果分析

SBR 小试 A、B 两组运行模式的进水条件相同, 进水的 COD 浓度范围为 92.5~187.1 mg/L, 平均浓度为 142.7 mg/L。

A 组连续进水运行模式的出水 COD 平均浓度为 24.8 mg/L, COD 的平均去除率为 82.7%。如图 5 所示;



1. 蠕动泵; 2. 电磁阀; 3. 排水口; 4. 取样口; 5. 气泵; 6. 空气转子流量计; 7. 曝气头; 8. 搅拌器; 9. 温控仪; 10. PH/OXi (WTW, 340i); 11. PH 传感器; 12. DO 传感器; 13. 加热棒; 14. 温度传感器; 15. ORP 传感器

Figure 3. Schematic diagram of SBR process

图 3. SBR 小试试验装置图

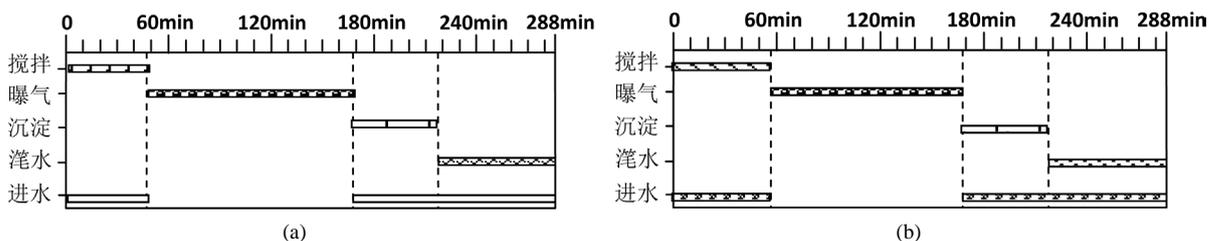


Figure 4. (a) The first phase; (b) The second phase

图 4. (a) B 组阶段一运行模式; (b) B 组阶段二运行模式

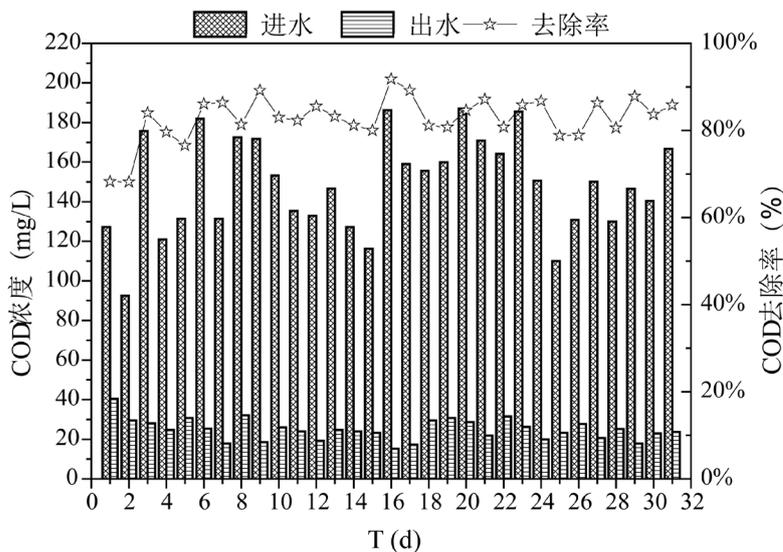


Figure 5. COD removal performance of group A

图 5. A 组 COD 去除情况

Table 1. Analysis of items and methods

表 1. 检测项目与分析方法

检测项目	分析方法	检测项目	分析方法
COD	快速消解法(兰州连华)	DO	WTW Multi340i
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	纳氏试剂光度法	ORP	WTW Multi340i
TN	过硫酸钾氧化-紫外分光光度法	MLSS	滤纸称重法

Table 2. The operating mode of stage two of group B

表 2. B 组二阶段具体运行模式

项目	搅拌 (min)	曝气 (min)	沉淀 (min)	滗水 (min)
阶段一	48	120	50	70
阶段二	56	112	50	70

B 组间歇进水运行模式阶段一的出水 COD 平均浓度为 25.0 mg/L, COD 的平均去除率应为 81.7%; 阶段二的出水 COD 平均浓度为 13.9 mg/L, COD 的平均去除率为 83.9%。如图 6 所示。

由上可以看出, 将连续进水模式改为间歇进水模式后, 对 COD 的去除效果并没有产生负面的影响, 其出水 COD 的平均浓度仍然小于 50 mg/L, 出水水质有机物指标可以稳定达到城镇污水排放一级 A 标准。

#### 4.2. 氨氮去除效果的分析

SBR 小试 A、B 两组运行模式进水氨氮的浓度范围为 20.3~40.3 mg/L, 氨氮平均浓度为 31.0 mg/L。

A 组连续进水运行模式的硝化效果较好, 出水氨氮的平均浓度为 0.5 mg/L, 氨氮的平均去除率达到 98.6% (如图 7 所示)。

B 组间歇进水运行模式阶段一出水氨氮平均浓度为 0.2 mg/L, 氨氮的平均去除率为 99.7%; 阶段二的出水氨氮平均浓度为 0.3 mg/L, 氨氮的平均去除率为 98.8% (如图 8 所示)。

通过分析, 将连续进水模式改为间歇进水模式后, 系统的硝化能力并没有减弱, 间歇进水模式 A/O 比分别为 1:2.5 和 1:2 时, 依然都能够实现很高的氨氮去除率, 其出水氨氮的平均浓度均小于 1.0 mg/L, 出水水质氨氮指标都可以稳定达到城镇污水排放一级 A 标准。

#### 4.3. 总氮去除效果的分析

SBR 小试 A、B 两组运行模式进水总氮的浓度范围为 31.8~41.9 mg/L, 总氮平均浓度为 31.8 mg/L, 为消除不同除碳氮比对两种不同运行模式总氮去除率的影响, 本实验严格控制碳氮比在 4.5 左右。

A 组连续进水运行模式出水总氮的平均浓度为 13.8 mg/L, 总氮的平均去除率为 56.1% (如图 9 所示)。

B 组间歇进水运行模式阶段一 A/O 比为 1:2.5 时: 出水总氮平均浓度为 12.0 mg/L, 总氮平均去除率为 62.9%, 此时 A 组连续进水运行模式出水总氮平均浓度为 13.3 mg/L, 总氮平均去除率为 58.0%;

B 组间歇进水运行模式阶段一 A/O 比为 1:2 时: 出水总氮平均浓度为 11.0 mg/L, 氨氮的平均去除率为 65.0%, 此时 A 组连续进水运行模式出水总氮平均浓度为 14.4 mg/L, 总氮平均去除率为 56.0%。

通过以上可以看出, 在碳氮比为 4.5 左右时, 间歇进水模式的总氮去除率始终高于连续进水模式。

间歇进水模式在 A/O 比为 1:2.5 时, 总氮去除率比连续进水模式高 4.9%; 间歇进水模式在 A/O 比为 1:2 时, 总氮去除率比连续进水模式高 9%。

间歇进水模式 A/O 比为 1:2 时比 A/O 比 1:2.5 时的总氮去除率高 2.1%。

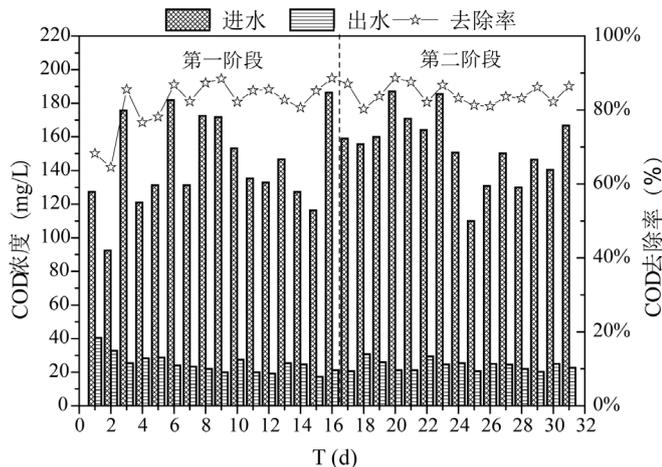


Figure 6. COD removal performance of group B

图 6. B 组 COD 去除情况

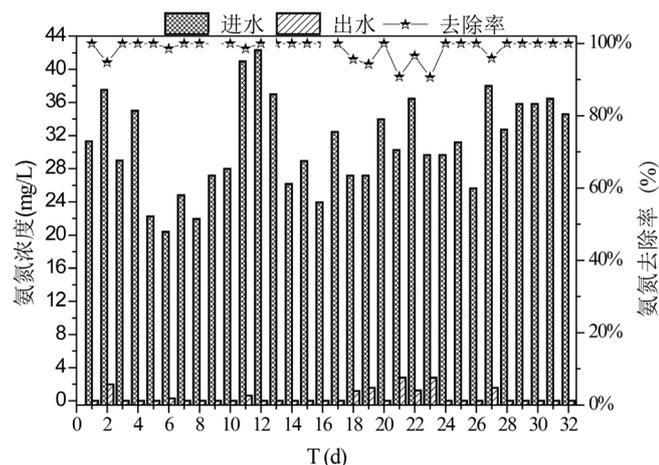


Figure 7.  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  removal performance of group A

图 7. A 组氨氮去除情况

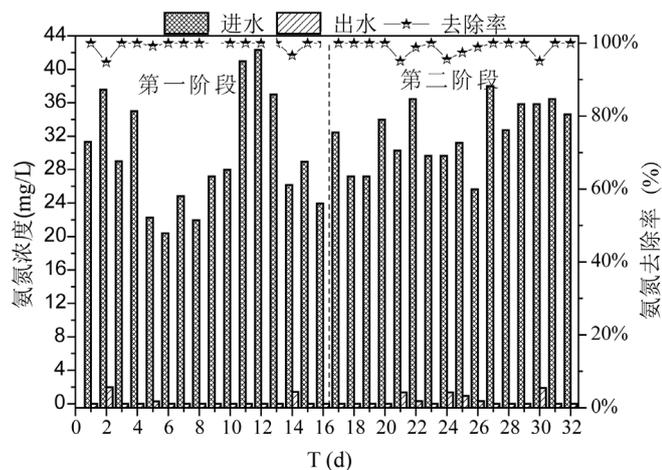


Figure 8.  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  removal performance of group B

图 8. B 组氨氮去除情况

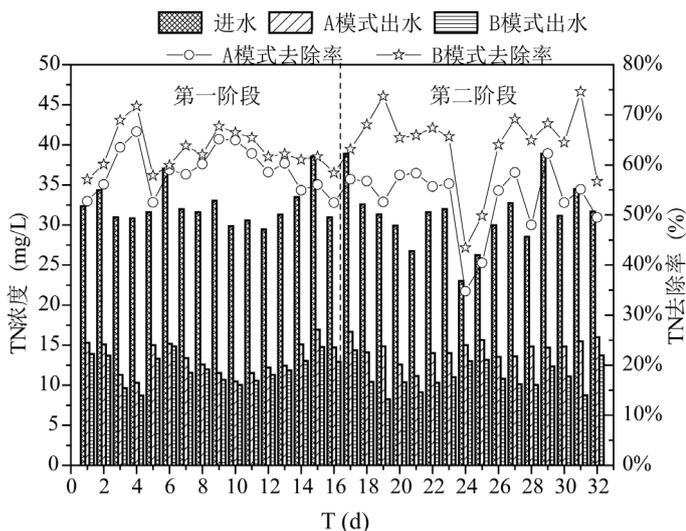


Figure 9. TN removal performance of group A, B  
图 9. A、B 两组总氮去除情况

## 5. 结论

SBR 工艺起初是为去除碳源有机物开发的，后来随着处理要求的提高，增加了脱氮功能，ICEAS 工艺虽然在传统 SBR 的基础上做出了改进，进水方式改为连续进水后简化了配水的设施，也省去了对配水的控制，从而使得 ICEAS 工艺可用于较大型的污水处理厂，然而其脱氮的功能并没有得到强化，为进一步提高 ICEAS 工艺污水处理厂的总氮去除率，还需要对其进行进一步的优化改进。

1) 连续进水方式不利于 ICEAS 工艺总氮的去除，改变进水模式，即搅拌前集中进水，系统内的微生物可最大程度的利用进水中的碳源进行反硝化，在提高系统反硝化效率的同时也为后继的曝气阶段减轻有机物负荷，适当降低能耗。曝气阶段停止进水，系统内留有大量的氨氮和少量的有机物。此时，硝化菌处于竞争优势，可快速利用水中溶解氧气对氨氮进行彻底的氧化降解，系统的硝化效果得到加强。将连续进水方式改为间歇进水方式后，总氮去除率平均可提高至少 5%；

2) 适当提高 ICEAS 工艺的 A/O 比，将 A/O 比从 1:2.5 提高到 1:2 后，总氮去除率得到进一步的提高，但当进一步提高 A/O 比出水氨氮浓度有增加的趋势，所以最佳 A/O 比为 1:2；

3) 连续进水模式改为间歇进水模式后，出水 COD、氨氮浓度均可以稳定达到城镇污水排放一级 A 标准，而磷由于后期的深度处理，出水浓度也可以实现城镇污水排放一级 A 标准。

## 基金项目

“十二五”国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07302002-06)。

## 参考文献 (References)

- [1] 张治中. 滇池氨氮与富营养化研究[J]. 环境科学导刊, 2007, 26(6): 34-36.
- [2] 高浒. 滇池富营养化治理障碍及对策研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2007: 102.
- [3] 刘宁, 等. 化学除磷工艺研究进展[J]. 化工进展, 2012, 31(7): 1597-1603.
- [4] 王文超, 张华, 张欣. 化学除磷在城市污水处理中的应用[J]. 水科学与工程, 2008(1): 14-16.
- [5] 张亚勤. 污水处理厂达到一级 A 排放标准中的化学除磷[J]. 中国市政工程, 2009(5): 40-41.
- [6] 申庆伟. 反渗透膜法在污水回用上的应用[J]. 石化技术, 2011, 18(3): 28-32.

- 
- [7] 祝贵兵, 彭永臻, 郭建华. 短程硝化反硝化生物脱氮技术[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(10): 1552-1557.
- [8] 杨麒, 等. 同步硝化反硝化的形成机理及影响因素[J]. 环境科学与技术, 2004, 27(3): 102-104.
- [9] 郭冬艳, 等. 同步硝化反硝化生物脱氮技术[J]. 安全与环境工程, 2009, 16(3): 41-44.
- [10] 姚俊芹, 周少奇. 厌氧氨氧化生物脱氮研究进展[J]. 化工学报, 2005, 56(10): 1826-1831.
- [11] 廖小兵, 等. 厌氧氨氧化在污水处理中的研究进展[J]. 微生物学通报, 2010, 37(11): 1679-1684.
- [12] 彭永臻, 马斌. 低 C/N 比条件下高效生物脱氮策略分析[J]. 环境科学学报, 2009, 29(2): 225-230.
- [13] 李淑更, 等. ICEAS 反应器处理城市污水的试验研究[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2004, 3(4): 361-364.
- [14] 辛振兴. ICEAS 工艺低碳氮比城市污水处理厂高效脱氮的升级改造研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京工业大学, 2014: 17.