

唐舒雯, 纪婧, 王梦娴, 等. 农村生活污水陶瓷膜-生物反应器处理工艺强化脱氮除磷研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(5): 1121-1129.  
TANG Shu-wen, JI Jing, WANG Meng-xian, et al. Enhancement of nitrogen and phosphorus removal in ceramic membrane bioreactor for rural sewage treatment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(5): 1121-1129.

# 农村生活污水陶瓷膜-生物反应器 处理工艺强化脱氮除磷研究

唐舒雯, 纪婧, 王梦娴, 陈佳仪, 李旭东, 邱江平\*

(上海交通大学农业与生物学院, 上海 200240)

**摘要:**传统膜生物反应器是农村生活污水处理的重要工艺之一,但其存在氮磷去除效果差等问题,本文旨在探究陶瓷膜生物反应器对农村生活污水的处理效果,并提高其脱氮除磷效果。陶瓷膜-生物反应器(C-MBR)是将好氧生物反应与无机陶瓷平板膜过滤技术相结合的工艺,具有占地面积小、维护简单、排泥量少等优点。本文利用陶瓷膜代替传统膜-生物反应器中的有机膜,对C-MBR进行强化脱氮除磷工艺研究,通过优化回流比、DO、HRT等进行强化脱氮,采用粉煤灰多孔填料吸附进行强化除磷。结果表明:在进水COD和TN、NH<sub>3</sub>-N、TP浓度分别为360.00~661.00、33.90~57.60、16.80~32.30 mg·L<sup>-1</sup>和4.78~5.70 mg·L<sup>-1</sup>,MLSS为3000 mg·L<sup>-1</sup>,膜孔径为50 nm条件下,C-MBR出水对应指标平均浓度分别为34.90、22.59、1.13 mg·L<sup>-1</sup>和4.57 mg·L<sup>-1</sup>,平均去除率分别为93.68%、47.86%、95.00%和12.32%。优化回流比至200%、DO浓度为2.00 mg·L<sup>-1</sup>、好氧池HRT为4 h时,TN平均去除率显著提高,最佳可达69.39%,出水平均浓度为12.52 mg·L<sup>-1</sup>,且此时出水稳定、能耗低;粉煤灰多孔填料在水力负荷0.33 m<sup>3</sup>·m<sup>-3</sup>·d<sup>-1</sup>条件下,对TP去除率可达90.90%,出水平均浓度为0.42 mg·L<sup>-1</sup>,满足一级A标准。使用1000 mg·L<sup>-1</sup>的次氯酸钠水溶液,以每片膜500 mL·30 min<sup>-1</sup>速度对膜进行在线清洗时,跨膜压差恢复速率最快,膜污染去除效果恢复最佳。优化回流比、DO、好氧池HRT能有效强化C-MBR脱氮效果,填料吸附磷能有效强化除磷效果。本研究为农村生活污水就地处理、提高C-MBR脱氮除磷效果提供了有益参考。

**关键词:**农村生活污水;MBR;陶瓷膜;强化脱氮;除磷填料

中图分类号:X703 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)05-1121-09 doi:10.11654/jaes.2018-1166

## Enhancement of nitrogen and phosphorus removal in ceramic membrane bioreactor for rural sewage treatment

TANG Shu-wen, JI Jing, WANG Meng-xian, CHEN Jia-yi, LI Xu-dong, QIU Jiang-ping\*

(School of Biology and Agriculture, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** The traditional Membrane Bio-reactor (MBR) is one of the most important treatment methods for rural sewage, but its nitrogen and phosphorus removal efficiency is rather low. Ceramic Membrane Bio-reactor (C-MBR) combines aerobic biological reaction with inorganic flat ceramic membrane filtration, and it requires less maintenance and has less sludge discharge. In this study, the ceramic membrane was used instead of traditional organic membrane. A series of experiments were conducted to study the enhancement of nitrogen removal in C-MBR by optimizing the reflux ratio, dissolved oxygen (DO), hydraulic retention time (HRT), porous filler adsorption was also used to enhance phosphorus removal in C-MBR. When operated under certain condition, the concentrations of chemical oxygen demand (COD), total nitrogen (TN), ammonium nitrogen (NH<sub>3</sub>-N) and total phosphorus (TP) of inflow were 360.00~661.00, 33.90~57.60, 16.80~32.30 and 4.78~5.77 mg·L<sup>-1</sup>, respectively; the corresponding average concentrations of outflow were 34.90, 22.59, 1.13 and 4.57 mg·L<sup>-1</sup>, respectively,

收稿日期:2018-09-10 录用日期:2018-10-24

作者简介:唐舒雯(1993-),女,浙江嘉兴人,硕士研究生,从事膜生物反应器处理生活污水研究。E-mail:shuwen\_tg@163.com

\*通信作者:邱江平 E-mail:qjp@sjtu.edu.cn

基金项目:国家科技部重点研发计划项目“水稻主产区氮磷流失综合防控技术与产品研发”(2016YFD0800500)

Project supported: The National Key Research and Development Program Project of the Ministry of Science and Technology of China (2016YFD0800500)

and the average removal rates were 93.68%, 47.86%, 95.0% and 12.32%, respectively. When the reflux ratio was optimized to 200%, the DO was  $2.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  and the HRT in the aerobic tank was 4 h, the nitrogen removal of C-MBR was strengthened, and the best TN average removal rate could reach 69.39%, and the corresponding average concentration of outflow was  $12.52 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . The packing absorption could strengthen phosphorus removal. When operated under optimal hydraulic load in packing absorption tank, which was  $0.33 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ , the removal rate of TP could reach 90.90%, and the average TP concentration in outflow was  $0.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . In addition,  $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  sodium hypochlorite solution had the best cleansing effect when the film was cleaned online at a speed of  $500 \text{ m} \cdot 30 \text{ min}^{-1}$  each film, since the membrane had the quickest recovery from pollution under this condition. Our results provide reference for rural domestic sewage treatment as well as MBR nitrogen and phosphorus removal enhancement.

**Keywords:** rural domestic sewage treatment; MBR; ceramic membrane; nitrogen removal enhancement; packing adsorption

我国农村每年约产生 80 亿  $\text{t}^{[1]}$  生活污水, 大部分未经处理便直接排入自然水系中。随着水体污染的加剧,《城镇污水处理厂污染物排放标准》 $^{[2]}$  对处理后污水的氨氮( $\text{NH}_3\text{-N}$ )、总氮(TN)、总磷(TP)等指标有了更严格的要求。

膜-生物反应器(MBR)利用膜的高效截留代替传统工艺中的二沉池,具有出水水质好、耐冲击负荷、产泥少、占地面积小等优点 $^{[3-4]}$ ,是农村生活污水处理的重要工艺之一。MBR工艺的核心是膜组件,其中有机膜的应用最广泛,材质主要为聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)、聚氯氟乙烯(polyvinylidene fluoride, PVDF) $^{[5-7]}$ 。但有机膜具有易损坏、易受化学物质侵蚀、易产生不可逆污染等缺点,影响处理效果,且日常维护管理复杂。农村地区经济技术相对落后,缺乏专业技术人员,传统 MBR 建成投产后难以保证科学的维护与管理 $^{[8]}$ 。相比而言,陶瓷膜具有抗污染性能好、耐酸碱性、机械强度大、结构稳定以及维护简单等优势 $^{[9]}$ ,更适合应用于 MBR 处理农村生活污水。

目前研究主要集中在 C-MBR 对于校园生活污水、医院污水、炼油废水的处理以及膜污染特性 $^{[10-13]}$ ,对于 C-MBR 在农村生活污水中的应用,尤其是脱氮除磷强化工艺鲜有报道。本研究采用浸没式平板陶瓷膜-MBR 工艺处理农村生活污水,对 C-MBR 处理农村生活污水的效果、脱氮除磷性能进行了强化研究。其中,通过优化回流比、DO、HRT 进行强化脱氮。由于传统 MBR 单一的工艺对磷的去除效果难以满足日益严格的排放标准,限制了其广泛应用 $^{[14]}$ 。目前,为解决 MBR 除磷效果差的问题,研究主要集中在化学法 $^{[15-16]}$ ,通过投加化学药剂进行除磷,填料吸附除磷在 C-MBR 农村生活污水中相对不多。本研究采用粉煤灰多孔填料吸附进行强化除磷,相比化学法,操作简单,维护量小。从而为 C-MBR 工艺在农村生活污水中的应用,以及脱氮除磷强化提供解决思路

和有益参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 工艺与装置

图 1 为强化前工艺流程与装置示意图。工艺设有调节池、缺氧池、厌氧池、好氧池和出水池等,各池材质均为有机玻璃。调节池容积为 500 L,用于配水并调节水质。好氧池长 25 cm,宽 25 cm,高 64 cm,容积为 40 L,缺氧池:厌氧池:好氧池体积比为 1:1:2,可根据试验要求调节水位和有效容积,同时设置陶瓷膜反冲洗装置。调节池中设置进水管,利用蠕动泵向缺氧池配水,后利用重力流入厌氧池,两池中设有搅拌器。好氧池内底部安装曝气穿孔管,利用曝气泵曝气,池中设有回流管,混合液经回流泵回流。膜组件放置在好氧池混合液中,抽吸出水。

### 1.2 试验材料

试验采用的平板陶瓷膜由河南方周瓷业生产。主要膜材质为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,膜孔径有 1000、500、100 nm 和 50 nm 四种。接种污泥来源于上海市长宁区天山路污水处理厂,该厂处理对象为城镇生活污水,污泥经两个月的培养驯化,浓度性质达到稳定后用于试验。试验用水为人工模拟生活污水,以葡萄糖为碳源,  $\text{NH}_4\text{Cl}$  为主要氮源,鱼粉蛋白胨为辅助氮源,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  为磷源。进水 COD 和 TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 的质量浓度分别为 360.00~661.00、33.90~57.60、16.80~32.30  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和 4.78~5.77  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

### 1.3 分析项目及方法

试验分析的项目主要有 COD、TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、MLSS、pH 和 DO 等,检测方法 COD 采用快速消解分光光度法, TN 采用碱性过硫酸钾紫外分光光度法,  $\text{NH}_3\text{-N}$  采用纳氏试剂分光光度法, TP 采用钼酸盐分光光度法, MLSS 采用烘干称量法, pH 采用酸度计(型号:WTW pH-3210), DO 采用便携式溶解氧仪(型号:

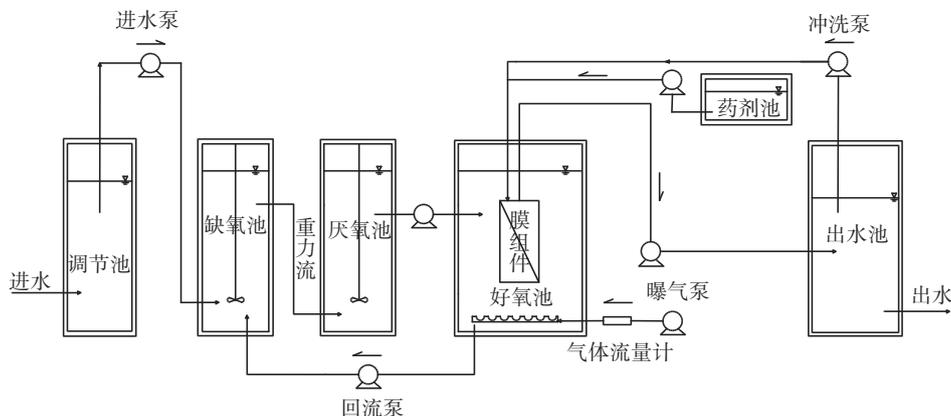


图1 强化前C-MBR工艺流程图

Figure 1 Flow diagram of C-MBR process before improvement

WTW Oxi-3310)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 污染物去除效果

经过前期预试验,确定在膜通量  $20 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 、膜孔径  $50 \text{ nm}$ 、好氧池  $\text{MLSS } 3000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  运行条件下,膜清洗周期最长且出水水质稳定。为明确传统C-MBR对氮磷去除的局限性,提供工艺优化方向,先在常规条件下[总HRT为6h(其实好氧池HRT 2h),DO 3.00  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,回流比50%]研究C-MBR去除效果。

#### 2.1.1 COD去除效果

C-MBR对于COD的去除效果见图2。由图2可知,进水COD平均浓度为  $554.80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,出水平均浓度为  $34.90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,平均去除率为93.68%,出水COD浓度满足一级A排放标准( $50.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )。其中,陶瓷膜进水COD平均浓度为  $298.63 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,出水平均浓度为

$34.90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,陶瓷膜对COD平均截留率可达90.16%。其原因是,膜池内的MLSS较高,有机物与微生物在池内充分反应;同时由于陶瓷膜对溶液中固体悬浮颗粒、蛋白质、酶等大分子有机物进行拦截,增加了微生物与有机物接触时间,强化了有机物的生物降解。

#### 2.1.2 TN去除效果

C-MBR对于TN的去除效果见图3。由图3可知,进水TN平均浓度为  $47.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,出水平均浓度为  $22.59 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,C-MBR对TN平均去除率为50.52%,出水TN浓度不满足一级A排放标准( $15.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )。其中,陶瓷膜进水TN平均浓度为  $27.52 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,出水平均浓度为  $22.59 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,陶瓷膜对TN平均截留率为18.02%。TN的去除主要靠好氧池的硝化作用与缺氧池的反硝化作用。此外,陶瓷膜会截留未被完全降解的含氮有机大分子。TN的去除受多个工艺参数影响,后续将进行强化脱氮工艺研究。

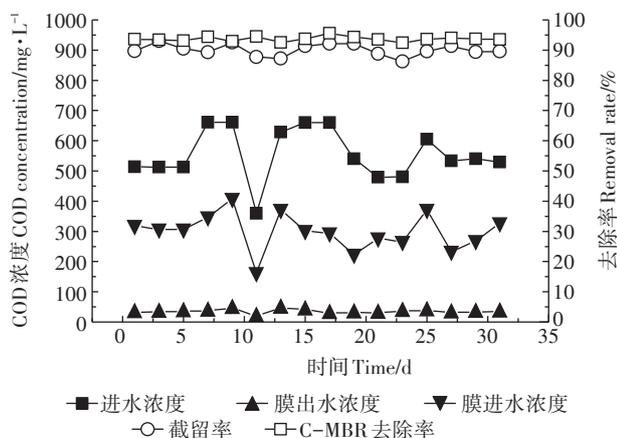


图2 常规条件下COD去除效果

Figure 2 COD removal rate under normal condition

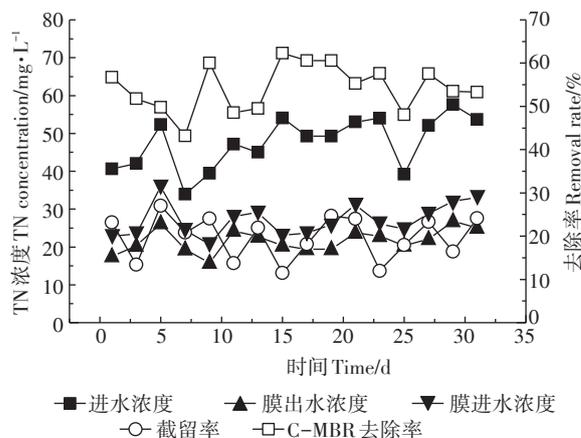


图3 常规条件下TN去除效果

Figure 3 TN removal rate under normal operation condition

### 2.1.3 NH<sub>3</sub>-N 去除效果

C-MBR 对 NH<sub>3</sub>-N 的去除效果如图 4 所示。由图 4 可知,进水 NH<sub>3</sub>-N 平均浓度为 24.77 mg·L<sup>-1</sup>,出水平均浓度为 1.13 mg·L<sup>-1</sup>,平均去除率为 95.00%,满足一级 A 排放标准(5.00 mg·L<sup>-1</sup>)。其中,陶瓷膜对 NH<sub>3</sub>-N 平均截留率为 6.20%。分析认为:NH<sub>3</sub>-N 主要以离子形式存在,直径小于膜孔径,可能存在 NH<sub>3</sub>-N 附着在悬浮颗粒物上,被陶瓷膜所截留,但总体来说陶瓷膜对 NH<sub>3</sub>-N 的截留作用很小。NH<sub>3</sub>-N 的去除主要是在有氧条件下,通过硝化作用转化为硝酸盐氮和亚硝酸盐氮。好氧池内 DO 充足且硝化菌浓度高,硝化反应彻底,因此 NH<sub>3</sub>-N 有较好的去除效果。

### 2.1.4 TP 去除效果

图 5 为 TP 的去除效果。由图 5 可知,进水 TP 平均浓度为 4.99 mg·L<sup>-1</sup>,出水平均浓度为 4.57 mg·L<sup>-1</sup>,平均去除率仅为 12.32%,远未达到一级 A 排放标准

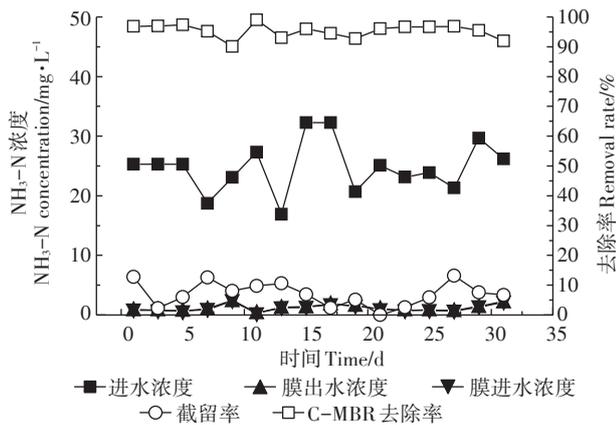


图4 常规条件下 NH<sub>3</sub>-N 去除效果

Figure 4 NH<sub>3</sub>-N removal rate under normal operation condition

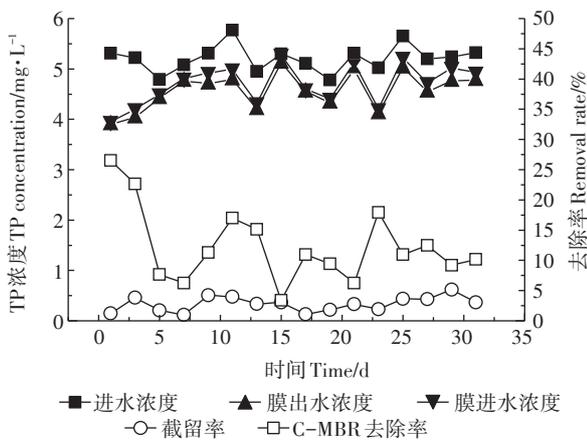


图5 常规条件下 TP 去除效果

Figure 5 TP removal rate under normal operation condition

(0.50 mg·L<sup>-1</sup>)。其中陶瓷膜对 TP 的截留率为 2.8%。分析认为:生物除磷主要利用聚磷菌在好氧状态下过量摄取磷,通过及时排放剩余污泥进行除磷。由于 C-MBR 中污泥被膜截留在好氧池中,泥龄长,排泥量少,因此 C-MBR 除磷效果差。为提高 TP 去除效果,后续将进行强化除磷研究。

### 2.2 膜组件污染速率

试验采用恒定膜通量的运行方式。如图 6 所示,因膜面污堵会出现压力损耗,跨膜压差随着过滤的不断进行而逐渐增加。陶瓷膜的物理特性使其能承受较高的连续运行跨膜压差(上限值为±60 kPa),且具有耐腐蚀性强(次氯酸钠溶液)的特点。

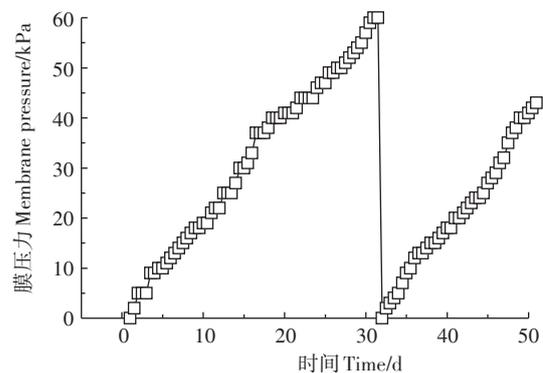


图6 膜压力变化曲线

Figure 6 Variation of membrane pressure during operation

当达到清洗压差时,利用加药泵将 1000 mg·L<sup>-1</sup> 的次氯酸钠溶液,以每片膜 500 mL·30 min<sup>-1</sup> 的速度缓慢注入陶瓷膜片中,经反冲洗装置进行清洗药剂排出,膜压力恢复速率最快,清洗效果最佳。理论上提高膜通量,可减少膜组件的数量,降低投资费用,但过高的膜通量会造成膜清洗频繁,加速膜的老化,增加膜的更换成本<sup>[17]</sup>,本试验中膜通量 20 L·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> 时性价比最高。

### 2.3 强化脱氮研究

为强化 C-MBR 脱氮效果,将对回流比、DO、好氧池 HRT 等工艺参数进行优化,以使 C-MBR 出水水质稳定,出水 TN 浓度达到一级 A 标准,且尽量减少能耗。

#### 2.3.1 回流比对脱氮效果的影响

回流作为活性污泥工艺中的重要参数之一,对脱氮起重要的作用<sup>[18]</sup>,与膜过滤技术结合后,回流也有了新的特点,能使膜池内混合液更充分混合接触<sup>[19]</sup>。通过改变回流比,旨在提高 C-MBR 脱氮效果,使出水 TN 浓度达到一级 A 标准。试验时间为 80 d,系统稳

定后工况为:总HRT为6h(好氧池HRT为2h),DO为 $3.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。好氧池MLSS、膜通量以及膜孔径工况维持不变。回流比设50%、100%、200%和300%四个梯度。图7为不同回流比下,主要污染物的去除情况。

由图7可知,随着回流比增加,TN去除率先增加后降低,当回流比为200%时,平均去除率最高,为64.60%,出水TN平均浓度为 $14.86\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,满足一级A排放标准( $15.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ );COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率均高于90%,出水满足一级A标准;TP去除率呈下降趋势。

这是因为:(1)当回流比提高,回流至缺氧池的硝态氮增多,经反硝化作用TN去除率提高;当回流比过高(如300%),回流量携带的氧增多,缺氧池内缺氧环境被破坏,反硝化菌活性被抑制<sup>[20]</sup>,且回流至缺氧段的硝态氮接近饱和,异养菌数量也增多,有限的碳源无法提供足够的电子供体,导致无法将回流的硝态氮完全还原<sup>[21]</sup>,TN去除率下降;(2)C-MBR耐冲击负荷能力较强,对COD有稳定的处理效果;(3)好氧池中硝化菌活性较高,硝化反应彻底,因此 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除效果好;(4)随着回流比增加,厌氧池中DO增加,影响厌氧释磷,不彻底的释磷不利于好氧条件下聚磷菌的过量吸磷<sup>[20]</sup>,因此TP去除率下降。综上,回流比为200%时,出水TN平均浓度满足一级A排放标准。因此是系统最佳回流比。

### 2.3.2 DO对脱氮效果的影响

曝气是污水生物处理系统的主要能耗,传统污水处理厂中鼓风机能耗占总能耗的50%左右,在二级生物处理单元中鼓风机电耗甚至占单元电耗的75%<sup>[22]</sup>。通过改变DO浓度,旨在使出水TN满足一级

A标准的同时,减少能耗。利用便携式溶解氧仪进行实时监测,通过数显气体流量计(型号MF-5712)调节曝气量的大小对DO浓度进行控制。设置DO浓度为 $0.50$ 、 $1.00$ 、 $2.00$ 、 $3.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 四个梯度,回流比200%,总HRT 6h(其中好氧池HRT 2h),其他参数维持不变,试验时间为80d。图8为不同DO下,主要污染物的去除情况。

由图8可知,随着DO浓度增加,TN去除率先升高后降低,当DO为 $2.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,平均去除率达到最高,为65.9%,此时出水TN浓度为 $14.13\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,满足一级A标准; $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率逐渐提高,当 $\text{DO}\geq 2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度才满足一级A排放标准( $5.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ );COD平均去除率均大于90%,无明显变化;TP去除率逐渐降低。

这是因为:(1)当DO浓度过低,好氧池中硝化反应不充分, $\text{NH}_3\text{-N}$ 出水不满足一级A标准。DO浓度增加,硝化菌活性增加, $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效果提高;(2)当DO浓度增加,硝化反应充分,因此回流的硝态氮增多,反硝化更加彻底,提高了TN去除效果。但当DO浓度过高,回流液中携带的DO抑制硝酸盐还原酶的合成和活性,反硝化作用受抑制<sup>[23]</sup>,降低了TN的去除效果,且增加能耗;(3)DO增加,回流液中携带的DO消耗了缺氧池中易降解的 $\text{BOD}_5$ ,碳源不足影响厌氧释磷,同时消耗了细胞内的聚羟基脂肪酸(PHA)<sup>[24]</sup>,造成除磷效果下降。综上,DO浓度为 $2.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,出水TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度均满足一级A排放标准,且该工况下曝气量小,能耗低,为最佳DO浓度。

### 2.3.3 好氧池HRT对脱氮效果的影响

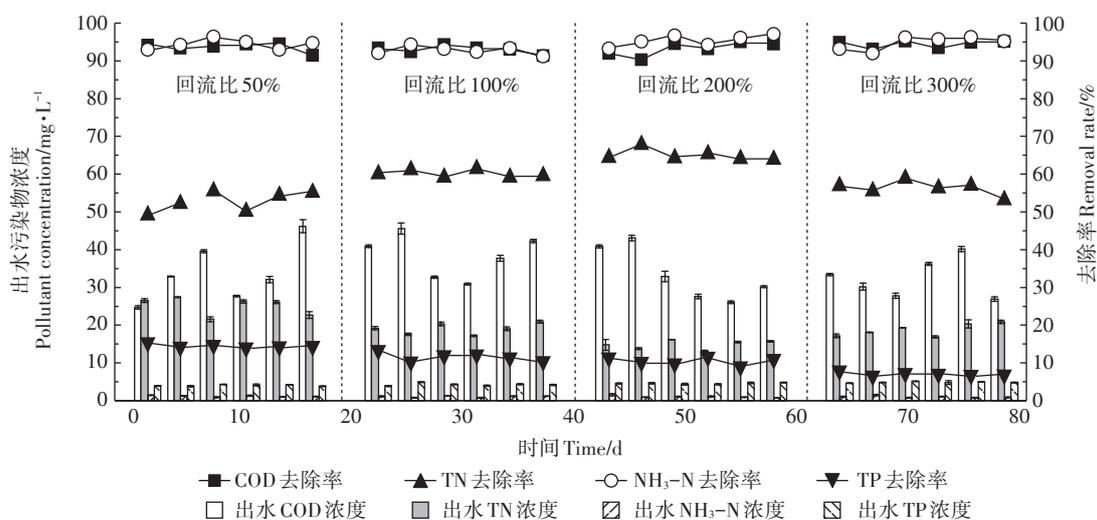


图7 C-MBR不同回流比下主要污染物的去除

Figure 7 Pollutants removal in C-MBR with different recirculation ratios

当好氧池 HRT 为 2 h, 回流比为 200%, DO 为  $2.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 虽然 C-MBR 出水 TN 平均浓度满足一级 A 标准, 但出水水质不稳定, 仍会出现不达标情况。通过改变好氧池 HRT, 可提高系统出水稳定性。试验时间为 80 d, 回流比 200%, DO 为  $2.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 厌氧池、好氧池各维持 2 h, 其他参数保持不变。图 9 为不同好氧池 HRT 下, 主要污染物的去除情况。

由图 9 可知, 当好氧池 HRT 为 4 h 时, TN 去除率达到最高, 平均去除率可达 69.39%, 出水平均浓度为  $12.52 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 且此时出水水质稳定, 运行中 TN 浓度均满足一级 A 标准 ( $15.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ );  $\text{NH}_3\text{-N}$  去除率先上升后稳定; COD 去除率上升; TP 去除率无明显变化。

这是因为: (1) 好氧池 HRT 从 2 h 增加到 4 h,  $\text{NH}_3\text{-N}$  去除率从 90.74% 增加到 94.60%, 说明 HRT 为 2 h 时, 反应池中各微生物种群没有充分的时间生长, 硝化反应未充分进行, 导致缺氧池中硝态氮浓度较低, 反硝化无法稳定充分进行<sup>[25]</sup>, 不能达到稳定除氮的目的。但是好氧池 HTR 过大 (如 6、8 h), 会导致好氧池中有有机物消耗过多, 缺氧池 C/N 比降低, 降低反硝化速率<sup>[26]</sup> 从而影响 TN 去除, 同时造成基建面积过大, 工程成本提高等问题; (2) 随着 HRT 的增长, 微生物对有机物的消解更彻底, COD 的去除率随之升高。综上, 好氧池 HRT 为 4 h 时, C-MBR 出水水质稳定, 出水 TN 浓度稳定满足一级 A 标准, 且此时 HRT 适中, 不会引起基建面积扩大带来的成本问题, 性价比高。

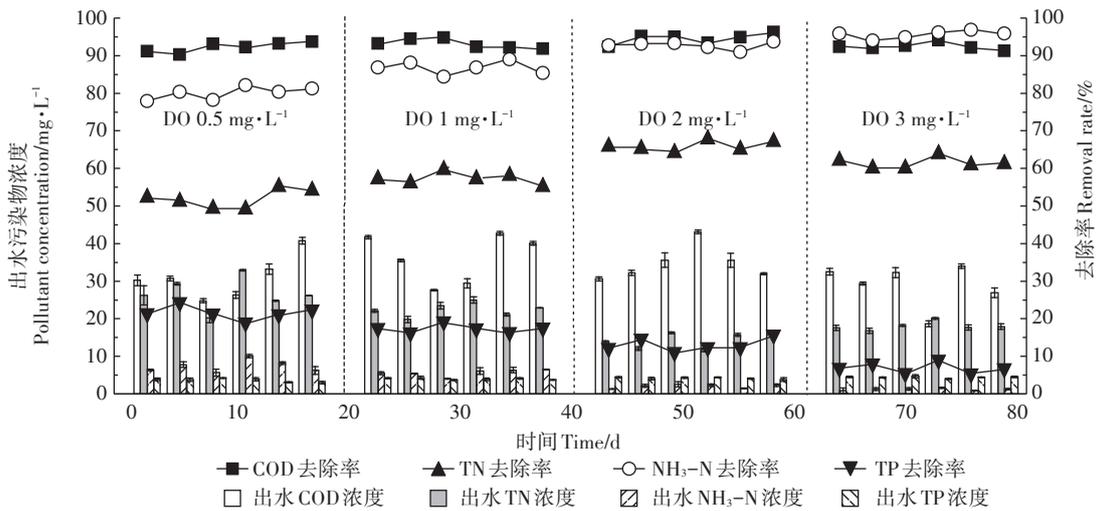


图 8 C-MBR 不同 DO 浓度下主要污染物的去除

Figure 8 Pollutants removal in C-MBR with different DO concentrations

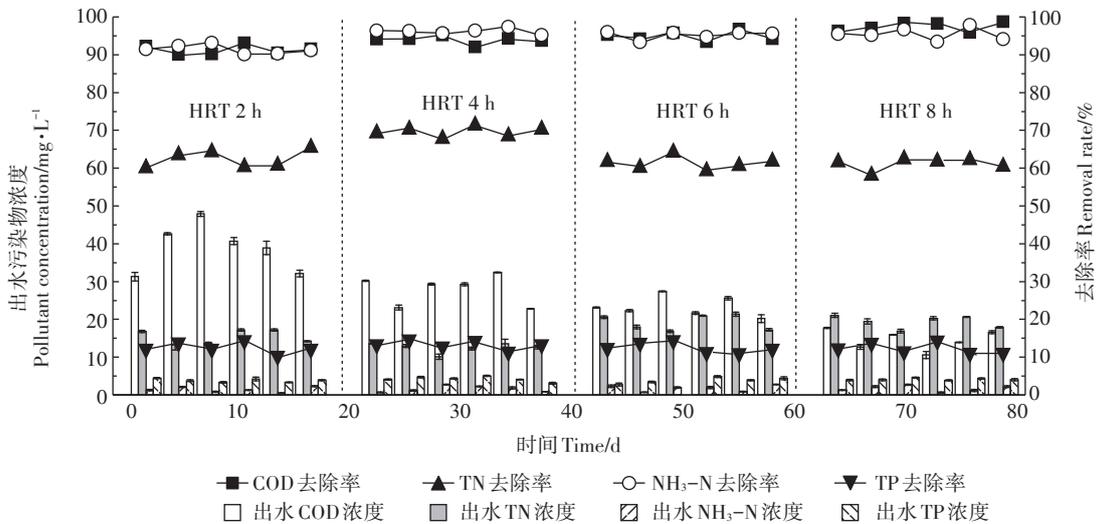


图 9 C-MBR 不同 HRT 下主要污染物的去除

Figure 9 Pollutants removal in C-MBR with different HRT

因此认为最佳HRT为4 h。

## 2.4 强化除磷研究

经试验发现,单一的C-MBR工艺除磷效果差,出水TP浓度远不满足一级A排放标准。目前,为解决MBR除磷效率低的问题,主要采用投加化学药剂的方法。但化学除磷存在很多缺点:需要不断投加药剂,且除磷过程中所形成的金属磷酸盐等最终形成固体沉淀,需要通过不断排泥去除,维护量大且管理复杂。

在本试验中,采用在C-MBR后端添加除磷填料段,利用填料吸附磷强化C-MBR除磷效果。改进后工艺流程如图10所示。填料池由有机玻璃制成,池中装填粒径为15~20 mm的粉煤灰多孔除磷填料。采用上向流设计,C-MBR出水通过循环泵从填料池底部进水管流入,经过填料,从上部溢流口流出,并设置多个溢流口。粉煤灰多孔除磷填料,由上海昂未环保发展有限公司提供,主要成分为粉煤灰、生石灰、磷石膏和水泥等,经高温高压改性而成。该填料具有重量小、机械强度高、孔隙发达、易挂膜等特点,其磷吸附容量为 $0.016 \text{ g P} \cdot \text{g}^{-1}$ 填料,孔隙率为55.38%,平均密度为 $800.00 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

为选择最佳水力负荷,共设置3组平行试验,分别设计水力负荷为 $0.17$ 、 $0.33$ 、 $0.66 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ ,分别对

进出水口进行采样。C-MBR维持最佳脱氮工艺参数:回流比为200%、DO  $2.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、总HRT 8 h(好氧池HRT 4 h),其他参数保持不变。除磷填料在不同水力负荷下的去除率如表1所示。

由表1可知,TP去除率随水力负荷的增加而降低。分析认为:当水力负荷过大,污染物与填料接触时间不充分,导致TP去除率低;当水力负荷过小,虽然TP去除效果好,但每日处理水量过低,投资增加。因此, $0.33 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 为最佳水力负荷,此时出水TP平均浓度为 $0.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,满足一级A排放标准( $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )。在最佳水力负荷下,C-MBR、脱磷池进出水TP浓度以及其去除率见图11。

由图11可知,采用粉煤灰多孔填料吸附除磷前,进水TP平均浓度为 $5.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,C-MBR平均出水浓度为 $4.57 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,工艺对TP平均去除率仅为12.32%;增加填料吸附除磷模块后,出水平均浓度为 $0.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,工艺对TP平均去除率提升为90.90%,出水TP浓度满足一级A排放标准( $0.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )。此外,采用吸附法除磷相比化学除磷,操作简便,管理容易,具有较好的推广价值。

## 3 结论

(1)传统C-MBR工艺处理农村生活污水,出水

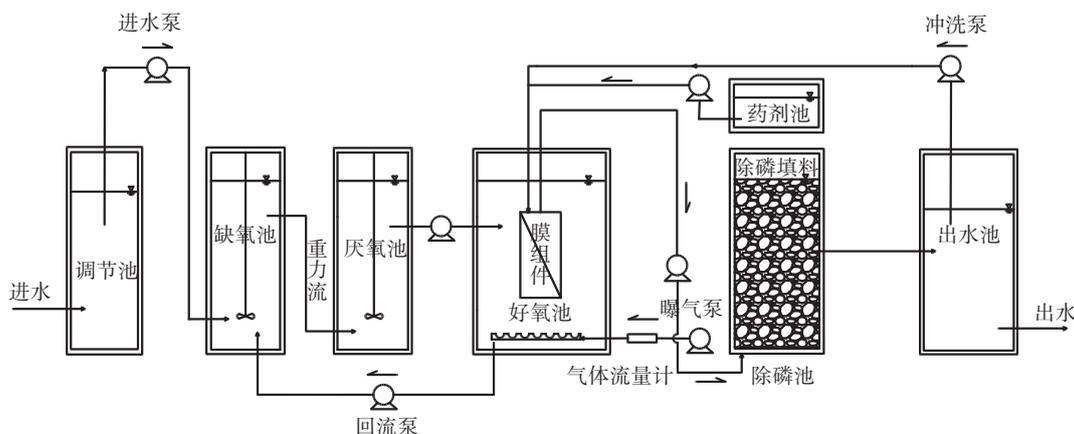


图10 除磷强化后C-MBR工艺流程图

Figure 10 Flow diagram of improved C-MBR process

表1 不同水力负荷下TP去除率

Table 1 TP removal percentage under different hydraulic loading conditions

水力负荷/ $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$	去除率/%											平均 去除率/%	出水/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
	1 d	5 d	10 d	15 d	20 d	25 d	30 d	35 d	40 d	45 d	50 d		
0.17	91.35	89.81	89.62	90.58	91.35	90.58	90.38	91.92	91.15	90.77	90.38	92.70	0.33
0.33	91.29	93.08	91.52	92.41	92.41	92.63	92.86	95.31	94.42	93.08	94.87	90.90	0.42
0.66	95.64	94.67	97.34	93.70	93.46	94.43	93.70	94.92	94.43	95.64	94.92	86.50	0.62

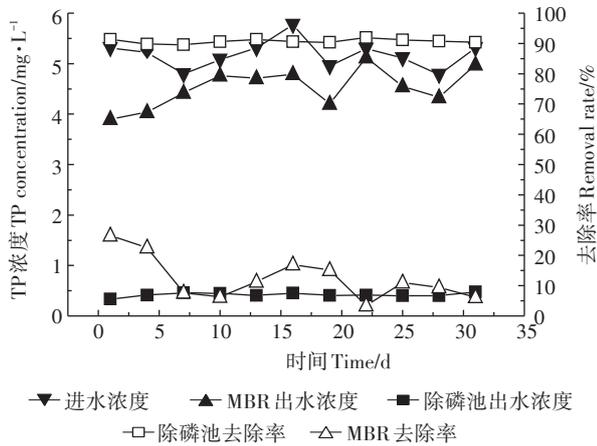


图 11 填料吸附 TP 去除效果

Figure 11 TP removal efficiency in combined process with packing absorption

TN 和 TP 不能满足一级 A 排放标准。优化回流比为 200%、好氧池 HRT 为 4 h、DO 浓度为  $2.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，C-MBR 脱氮效果显著提高，TN 去除率可达 69.39%，平均出水浓度为  $12.52 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，满足一级 A 排放标准。

(2) 利用粉煤灰多孔填料对污水中的磷进行吸附去除，在水力负荷  $0.33 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$  条件下，TP 去除率可达 90.90%，平均出水浓度为  $0.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，满足一级 A 排放标准。

(3) 通过优化运行参数，增加吸附除磷段，C-MBR 工艺出水氮、磷指标可同时达到一级 A 排放标准，系统运行稳定，且操作简单、维护量小、能耗低。

#### 参考文献:

- 李云. 农村生活污水治理技术分析[J]. 资源信息与工程, 2017, 32(1): 175-176.  
LI Yun. Analysis of rural sewage treatment technology[J]. *Resource Information and Engineering*, 2017, 32(1): 175-176.
- 中国环境保护部. 《城镇污水处理厂污染物排放标准》GB 18918—2002[S]. 北京: 中国环境保护部, 2002.  
Ministry of Environmental Protection of PRC. Standards for pollutant discharge in urban sewage treatment plants GB18918—2002[S]. Beijing: Ministry of Environmental Protection of PRC, 2002.
- 曾勇. MBR 工艺的特点及应用[J]. 工程技术, 2014, 14: 180-181.  
ZENG Yong. Characteristics and applications of MBR technology[J]. *Engineering Technology*, 2014, 14: 180-181.
- Shariati F P, Mehrnia M R, Sarrafzadeh M H, et al. Fouling in anovel airlift oxidation ditch membrane bioreactor (AOXMBR) at different high organic loading rate[J]. *Separation Purification Technology*, 2013, 105: 69-78.
- Rahman M M, Al-Malack M H. Biochemical kinetics of cross flow membrane bioreactor processes in the treatment of refinery wastewater [J]. *International Journal of Environmental Research*, 2012, 6(1): 285-296.
- 冯超群, 魏强, 王锋. MBR 工艺在含油废水处理中的应用[J]. 中外能源, 2011, 16(5): 115-118.  
FENG Chao-qun, WEI Qiang, WANG Feng. Application of MBR process in the treatment of oily wastewater[J]. *China and Foreign Energy*, 2011, 16(5): 115-118.
- 孙武, 王泉, 王能才, 等. 国产 PVDF 中空纤维膜在炼油废水深度处理回用中的应用[J]. 石油炼制与化工, 2013, 44(3): 79-82.  
SUN Wu, WANG Quan, WANG Neng-cai, et al. Application of domestic PVDF hollow fiber membrane in advanced treatment and reuse of refinery wastewater[J]. *Petroleum Refining and Chemical Industry*, 2013, 44(3): 79-82.
- 谭学军, 张惠锋, 张辰. 农村生活污水收集与处理技术现状及进展[J]. 净水技术, 2011, 30(2): 5-9, 13.  
TAN Xue-jun, ZHANG Hui-feng, ZHANG Chen. Status and progress of rural domestic sewage collection and treatment technology[J]. *Water Purification Technology*, 2011, 30(2): 5-9, 13.
- 张小赛, 倪卫红. 陶瓷膜发展现状及应用研究[J]. 环境工程, 2013, 31(6): 108-111.  
ZHANG Xiao-sai, NI Wei-hong. Development and application of ceramic membrane[J]. *Environmental Engineering*, 2013, 31(6): 108-111.
- 华文强, 车津程, 李亮, 等. C-MBR 处理高浓度气田废水中试试验[J]. 工业水处理, 2014, 34(3): 18-21.  
HUA Wen-qiang, CHE Jin-cheng, LI Liang, et al. Pilot test of C-MBR for treating high concentration gas field wastewater[J]. *Industrial Water Treatment*, 2014, 34(3): 18-21.
- 华文强, 农秋悦, 车津程, 等. C-MBR 工艺对校园污水再生回用处理中的试验研究[J]. 水处理技术, 2014(2): 88-91.  
HUA Wen-qiang, NONG Qiu-yue, CHE Jin-cheng, et al. Experimental study on the treatment of campus sewage by C-MBR process[J]. *Water Treatment Technology*, 2014(2): 88-91.
- 常红晨, 操家顺, 周彬宇. 陶瓷膜生物反应器在传染病医院污水处理中的应用[J]. 净水技术, 2016, 35(5): 100-103.  
CHANG Hong-chen, CAO Jia-shun, ZHOU Bin-yu. Application of ceramic membrane bioreactor in sewage treatment of infectious diseases hospital[J]. *Water Purification Technology*, 2016, 35(5): 100-103.
- 高冰, 刘宏菊, 郭颀, 等. 新型陶瓷平板膜 MBR 工艺在炼油废水处理中的应用[J]. 环境工程, 2016(9): 29-32.  
GAO Bing, LIU Hong-ju, GUO Xie, et al. Application of ceramic flat membrane MBR process in refinery wastewater treatment[J]. *Environmental Engineering*, 2016(9): 29-32.
- Drews A. Membrane fouling in membrane bioreactors—characterization, contradictions, cause and cures[J]. *Journal of Membrane Science*, 2010, 363(1/2): 1-28.
- 郝晓地, 李天宇, 吴远远, 等. A<sup>2</sup>/O 工艺用于污水处理厂升级改造的适宜性探讨[J]. 中国给水排水, 2017, 33(21): 18-24.  
HAO Xiao-di, LI Tian-yu, WU Yuan-yuan, et al. Suitability of A<sup>2</sup>/O process for upgrading of sewage treatment plants[J]. *China Water Supply and Drainage*, 2017, 33(21): 18-24.

- [16] 王磊, 黄勇, 郭召海. 钾明矾缓释除磷剂处理分散式农村生活污水[J]. 环境工程学报, 2017(12):6290-6294.  
WANG Lei, HUANG Yong, GUO Zhao-hai. Potassium alum slow-release phosphorus removal agent for dispersed rural domestic sewage treatment[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2017(12):6290-6294.
- [17] 蒋岚岚, 张万里, 胡邦, 等. 城镇污水处理工程MBR工艺膜系统设计关键技术[J]. 中国给水排水, 2011, 27(20):55-60.  
JIANG Lan-lan, ZHANG Wan-li, HU Bang, et al. Key technology of MBR process membrane system design for urban sewage treatment project[J]. *China Water Supply and Drainage*, 2011, 27(20):55-60.
- [18] Baeza J A, Gabriel D, Lafuente J. Effect of internal recycle on the nitrogen removal efficiency of an anaerobic/anoxic/oxic(A<sup>2</sup>/O) wastewater treatment plant[J]. *Process Biochem*, 2004, 39(1):1615-1624.
- [19] Wang Z H, Liang H, Ou F S, et al. Start up of a gravity flow CANON-like MBR treating surface water under low temperature[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, 217(1):466-474.
- [20] 王佳伟, 周军, 甘一萍, 等. 溶解氧对A<sup>2</sup>/O工艺脱氮除磷效果的影响以及解决方法[J]. 给水排水, 2009(1):35-37.  
WANG Jia-wei, ZHOU Jun, GAN Yi-ping, et al. Effect of dissolved oxygen on nitrogen and phosphorus removal efficiency of A<sup>2</sup>/O process and its solution[J]. *Water Supply and Drainage*, 2009(1):35-37.
- [21] 王德美, 王晓昌, 唐嘉陵, 等. 不同回流比和SRT对A/P-MBR脱氮除磷的影响[J]. 工业水处理, 2016(1):55-58.  
WANG De-mei, WANG Xiao-chang, TANG Jia-ling, et al. Effects of different reflux ratios and SRT on nitrogen and phosphorus removal by A/P-MBR[J]. *Industrial Water Treatment*, 2016(1):55-58.
- [22] 常江, 杨岸明, 甘一萍, 等. 城市污水处理厂能耗分析及节能途径[J]. 中国给水排水, 2011(4):33-36.  
CHANG Jiang, YANG An-ming, GAN Yi-ping, et al. Energy consumption analysis and energy saving approaches of municipal sewage treatment plants[J]. *China Water Supply and Drainage*, 2011(4):33-36.
- [23] Oh J. Oxygen effects on activated sludge denitrification in sequencing batch reactors[D]. United States: University of Colorado, 2001.
- [24] Takabatake H, Satoh H, Mino T, et al. PHA (polyhydroxyalkanoate) production potential of activated sludge treating waste water[J]. *Wat Sci Tech*, 2002, 45(12):119-126.
- [25] Guadie A, Xia S Q, Zhang Z Q, et al. Simultaneous removal of phosphorus and nitrogen from sewage using a novel combo system of fluidized bed reactor-membrane bioreactor (FBR-MBR) [J]. *Bioresour Technol*, 2013, 149(12):276-285.
- [26] Mohan T V K, Renu K, Nancharaiah Y V, et al. Effect of C/N ratio on denitrification of high-strength nitrate wastewater in anoxic granular sludge sequencing batch reactors[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 91(6):441-448