

复合式膜生物反应器的小区污水回用试验研究

常颖¹, 王宝贞¹, 高欣²

(1. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 中国市政工程东北设计研究院, 吉林 长春 130021)

摘要: 采用复合式膜生物反应器 (HMBR) 工艺进行了小区污水处理和回用的试验研究. 工艺设计的特点为通过曝气对水流的循环作用实现膜表面截留的污泥与硝化液的自动回流, 简化 A/O 系统的运行. 该工艺环境影响因素的分析表明系统温度为 25 左右、进水 pH 值为 6.1~7.0、DO 为 1.0~1.5 mg/L 时, HMBR 能够有效地去除水中的 COD、BOD₅、NH₄⁺-N 和 TN, 平均去除率分别为 94.5%、99.3%、99.4% 和 84.7%, 并且膜出水中检测不出 SS 和大肠菌群, 浊度 < 2 NTU. 出水满足 CJ25.1-89《生活杂用水水质标准》, 经消毒后可用于小区绿化、冲刷、扫除、洗车等场合.

关键词: 污水回用; 复合式膜生物反应器 (HMBR); 脱氮

中图分类号: X703.1

文献标识码: A

文章编号: 0367-6234(2003)02-0152-05

HMBR for reclamation waste water from living quarters

CHANG Ying¹, WANG Bao-zhen¹, GAO Xin²

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. China Northeast Municipal Engineering Design and Research Institute, Changchun 130021, China)

Abstract: The reclamation of wastewater from living quarters by hybrid membrane bio-reactor (HMBR) process which automatically recycles sludge and nitrate by aeration in the submerged biofilm unit was studied by analysing the circumstance influence factors. It was therefore founded that under the conditions of about 25, pH 6.1~7.0 and DO 1.0~1.5 mg/L, COD, BOD₅, NH₄⁺-N and TN were removed efficiently by HMBR and the average removal efficiencies were 94.5%, 99.3%, 99.4% and 84.7%, respectively. Both SS and coliforms were below the detection limits in the permeate of membrane, and the turbidity was less than 2 NTU. The treatment effluent meets the Miscellaneous Domestic Water Quality Standard (CJ25.1-89), and can be used for watering green belts and toilet flushing after disinfection.

Key words: wastewater reclamation; hybrid membrane bio-reactor (HMBR); nitrogen removal

建筑小区的生活污水经收集后通常送入城市污水厂处理排放. 为缓解城市用水紧张, 开源节流, 可在小区内建设小型的污水处理回用设施, 将处理后的水回用于小区内的绿化、厕所便器冲洗、洗车和清洁等, 从而获得良好的社会效益和经济效益.

膜生物反应器 (MBR) 是一种由生物处理单元和膜分离单元相结合的新型水处理技术. 与传统的生物处理技术相比, MBR 具有处理效率高、出水水质好而且稳定、设备紧凑、占地面积小、易于实现自动控制、运行管理简单等优点^[1,2]. 从目前研究发展的趋势看, 中水回用将是 MBR 在我国推广应用的主要方向^[3], 但目前我国的应用实例尚少. 为推进膜生物反应器的工程化应用, 本试验采用 HMBR 工艺对小区生活污水的处理和回用进行了研究.

收稿日期: 2002-05-27.

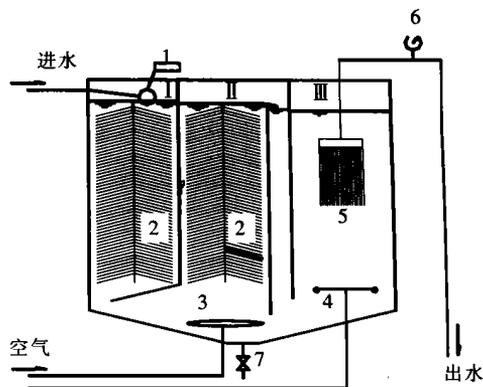
基金项目: 95 国家科技攻关项目 (96-909-01).

作者简介: 常颖 (1976-), 女, 博士研究生;

王宝贞 (1932-), 男, 教授, 博士生导师.

1 HMBR 小试装置

试验装置为自行设计的缺氧-好氧膜生物反应器,见图1,共由三个单元组成。为缺氧生物反应器单元,为好氧生物反应器单元,为膜分离单元。三个单元的底部设计成相连通的形式,通过曝气对水流的循环作用将膜截留的污泥和硝化液自动回流,缺氧和好氧交界处硝化液中的 $\text{NO}_x - \text{N}$ 通过扩散作用进入缺氧单元。单元、的容积分别为 16 L,内部均装填有弹性立体填料,装填密度为 30%。试验用膜为聚丙烯中空纤维超滤膜,面积为 2 m^2 ,孔径为 $0.1 \mu\text{m}$,膜组件长度为 0.5 m。试验装置通过浮球阀控制进出水量的平衡。放入反应器内的超滤膜首先经玻璃制的水射器抽吸出水,然后由净水压差提供出水动力。试验期间通过调整净水压差将系统的出水量控制在 4 L/h,膜通量为 $2 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。单元采用穿孔管早晚各空曝气 30 min 的方式以减缓膜污染,曝气量为 $0.018 \sim 0.024 \text{ m}^3/\text{h}$ 。试验期间除取样外,没有进行排泥操作。



1.浮球阀;2.弹性立体填料;3.微孔曝气器;4.穿孔曝气管;5.中空纤维超滤膜;6.压力表;7.排泥阀

图1 HMBR试验装置

Fig. 1 HMBR test setup

小区污水不同于城市污水(常包括部分工业废水),属生活污水范畴。其水质水量变化较大,污染物浓度偏低,可生化性好^[4]。试验期间,以合成生活污水模拟小区污水,由淀粉、蔗糖、蛋白胨、 NH_4Cl 、 NaH_2PO_4 、 KH_2PO_4 、 Na_2CO_3 、 NaHCO_3 、食用碱等配制而成,营养比控制在 $m(\text{BOD}_5) : m(\text{N}) : m(\text{P}) = 100 : 5 : 1$ 。具体水质情况见表1。水质分析根据国家环保局的“水和废水监测分析方法”进行。

表1 试验用水水质

Table 1 Water quality of influent

$\frac{\text{COD}}{\text{mg L}^{-1}}$	$\frac{\text{BOD}_5}{\text{mg L}^{-1}}$	$\frac{\text{SS}}{\text{mg L}^{-1}}$	$\frac{\text{NH}_4^+ - \text{N}}{\text{mg L}^{-1}}$	$\frac{\text{NO}_2^- - \text{N}}{\text{mg L}^{-1}}$	$\frac{\text{NO}_3^- - \text{N}}{\text{mg L}^{-1}}$	$\frac{\text{TN}}{\text{mg L}^{-1}}$	$\frac{\text{TP}}{\text{mg L}^{-1}}$	浊度 NTU	pH
129 ~ 544	58 ~ 207	65 ~ 250	13 ~ 33	< 0.04	< 0.05	21 ~ 44	1 ~ 3	38 ~ 160	6.1 ~ 7.0

2 环境影响因素分析

系统接种生物污泥稳定后,进行了环境因素(温度、pH、DO)对 HMBR 运行效果影响的分析。此时好氧单元的附着生物量为 $4\ 200 \text{ mg/L}$,悬浮污泥量为 $1\ 000 \text{ mg/L}$;缺氧单元的附着生物量为 $4\ 900 \text{ mg/L}$,因该单元内未设搅拌设备,悬浮污泥量很低。

2.1 温度

试验期间,缺氧、好氧和膜分离单元的水温变化如图2所示。温度变化对 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 去除的影响如图3~5所示,此时进水的 pH 值为 6.1~7.0,DO 为 1.0~2.0 mg/L。

初期系统的温度为 16~17。19 d 后在前段缺氧单元内放入了加热器,将水温控制在 24~26

此时好氧单元的温度上升到 19~20,膜分离单元的温度变化不大;21 d 后在好氧单元内也放入了加热器,将该单元的温度控制在 25 左右,此时膜分离单元的温度为 18~20。

从图3中可以看出,温度变化对 COD 的去除影响不大。在前 10 d 里,生物反应器对 COD 的去除率为 70% 多, HMBR 对 COD 的总去除率为 80% 多。这是因为初期系统的污泥浓度偏低,致使 COD 的去除率较低;余下的时间里,生物反应器对 COD 的去除率均在 80% 以上, HMBR 对 COD 的总去除率在 90% 以上。当进水的 COD 变化较大时,上清液(膜滤前水)中的 COD 也随之发生较大波动,但膜出水可稳定在 30 mg/L 以下。可见,膜对整个系统的稳定运行起着重要的作用,为系统提供了较强的抗冲击负荷能力。

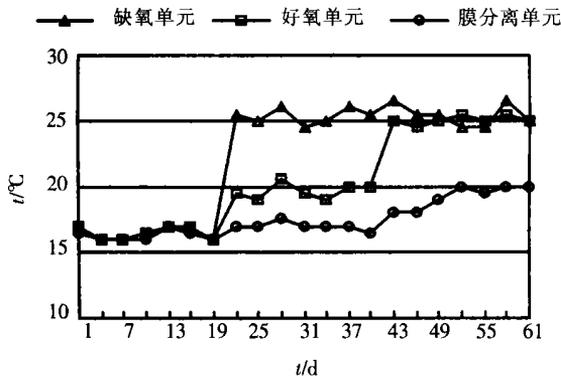


图2 缺氧、好氧和膜分离单元的温度变化
Fig. 2 Variation of temperature in anoxic, aerobic and UF units

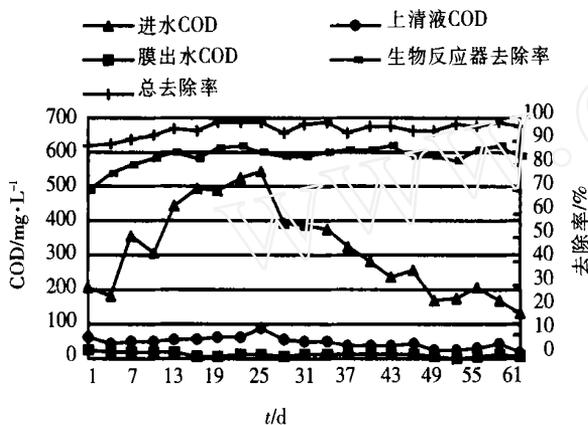


图3 相应于温度的变化,COD随运行时间的去除情况
Fig. 3 COD evolution and removal with operation time

从图 4 和 5 中可以看出,温度的变化对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 的去除有着显著的影响.当水温较低时(16~17 °C),生物反应器内 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 的去除率仅为 50%左右.当在缺氧单元内放入加热器后,生物反应器内 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 的去除率均上升 20%多,达 70%以上;当在好氧单元内也放入加热器后, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率又有了更大的上升,最高可达 99%以上,出水中检测不出 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$;TN 的去除率在 80%以上,系统的总去除率为 90%以上,获得了良好的脱氮效果.

温度对硝化和反硝化过程的影响主要是由于温度的高低影响了硝化细菌和反硝化细菌的增殖速率和代谢活力,从而影响整个脱氮过程.在进行生物脱氮的过程中,应将温度控制在适宜的范围(20~30 °C).由于小区的生活污水量较少(一般 $< 1\ 000\ \text{m}^3/\text{d}$),因此对于进行脱氮处理的工艺设施可考虑安装在室内,并加保温措施.

2.2 pH值

试验期间,当系统温度为 25 °C 左右、DO 为 1.0

~2.0 mg/L 时,对缺氧、好氧和膜分离单元的 pH 值变化进行了测试,如图 6 所示.从图 6 中可以看出,进水的 pH 值为 6.1~7.0,HMBR 出水的 pH 值在 7~8.整个系统内的 pH 值呈逐渐上升的趋势,膜出水的 pH 值和好氧单元的 pH 值基本相等.

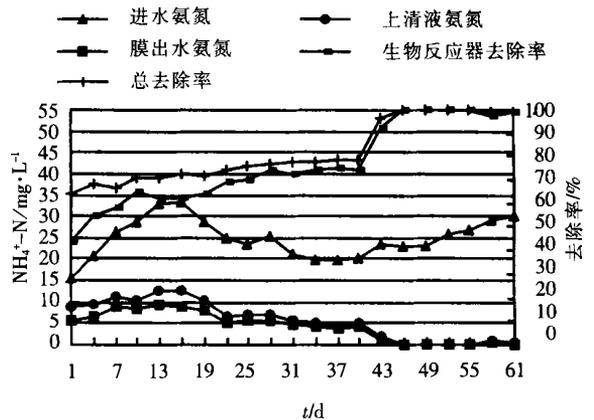


图4 相应于温度的变化, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 随运行时间的去除情况
Fig.4 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ evolution and removal with operation time

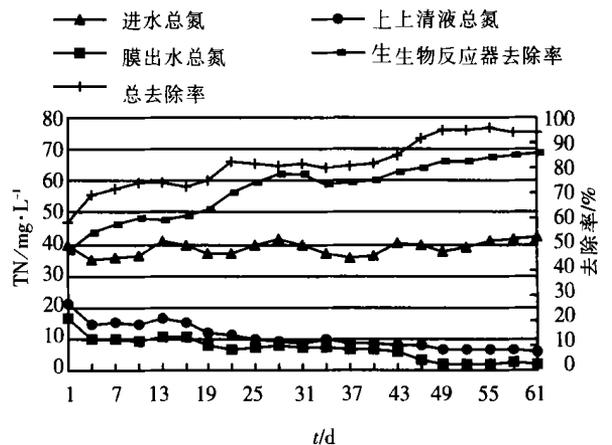


图5 相应于温度的变化,TN随运行时间的去除情况
Fig. 5 TN evolution and removal with operation time

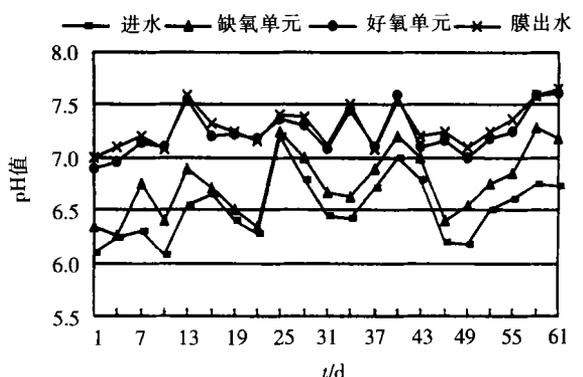


图6 HMBR内pH值的变化情况
Fig. 6 Variation of pH in HMBR

有研究表明^[5],pH值随BOD₅去除率的增加而增加.在污泥停留时间长的情况下,碳源BOD₅的氧化可产生碱度,相应地每去除1 mgBOD₅就可产生0.3 mg的碱度.对于污泥龄较长的生物处理系统,可根据出水的pH值变化情况初步判断系统对有机物的去除情况.

在本工艺系统内,生物反应器部分采用的是复合淹没式生物膜工艺,试验期间,除取样外,未进行排泥操作.在碳源BOD₅的氧化过程中产生一定的碱度,是系统pH值上升的一个原因;此外还有:(1)在缺氧单元,由于进行反硝化能够产生一定的碱度;(2)在曝气量较大的情况下,可以吹脱微生物氧化有机物产生的CO₂,使CO₂+H₂O \rightleftharpoons HCO₃⁻+H⁺的电离平衡向右进行的趋势减弱;(3)在具有缺氧微环境的情况下(好氧单元的生物膜),即生物反应器内同时存在硝化反硝化,此时反硝化反应的进行可以产生一定量的碱度.

2.3 溶解氧

将系统温度控制在25℃左右,进水pH值为6.1~7.0,对好氧单元不同DO质量浓度对生物反应器内COD、NH₄⁺-N和TN去除率的影响进行了测试,以寻求最佳的曝气量和适宜的DO含量.如图7所示.

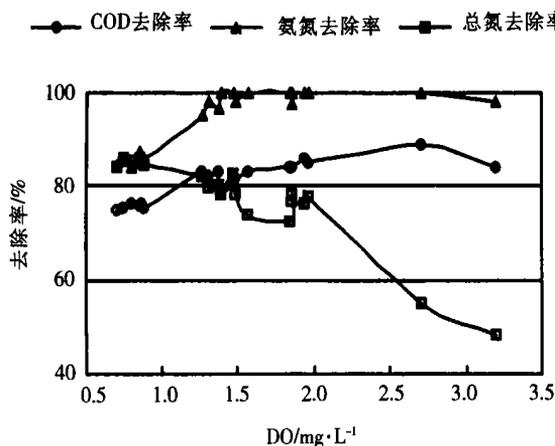


图7 DO对COD、NH₄⁺-N和TN去除率的影响

Fig.7 Removal efficiencies of COD, NH₄⁺-N and TN at different DO

依据图7的试验数据,在生物反应器内:当好氧单元的DO质量浓度为0.5~1.0 mg/L时,COD的去除率约为70%,NH₄⁺-N和TN的去除率约为85%;当DO的质量浓度>1.0 mg/L,NH₄⁺-N的去除率在95%以上,最高时出水检测不出NH₄⁺-N;DO为1.0~1.5 mg/L时,COD和TN的去除率约为80%;DO为1.5~2.0 mg/L时,COD的去除率上升到85%;而TN的去

除率下降到75%;DO>2.0 mg/L时,COD的去除率进一步提高,而TN的去除率已降至60%以下.此时系统的曝气量较大,填料上的生物膜已开始减少,系统对COD、NH₄⁺-N和TN的去除均会受到不同程度的影响,因此试验没有继续进行.

由此可见,当DO质量浓度增加时,COD的去除呈上升趋势,而TN的去除则呈下降趋势.当DO质量浓度为1.0~2.0 mg/L时,NH₄⁺-N的去除并没有受到太大的影响.综上,建议将好氧单元DO的质量浓度控制在1.0~1.5 mg/L,此时生物反应器能达到良好的有机物、NH₄⁺-N和TN的去除效果.控制曝气量的大小,将有利于节省能耗,降低运行费用.

在好氧单元,随着弹性填料上生物膜的逐渐增厚,在溶解氧扩散的过程中,有利于在生物膜内部形成缺氧微环境,从而发生同时硝化反硝化过程,能有效地进行生物脱氮.

在缺氧单元和好氧单元的交界处(用折板分隔开),可明显地观察到折板两侧分别是黑色和黄褐色的污泥.由试验数据发现:在折板上5 cm的取样口处,NO₂⁻、NO₃⁻的含量是最低的,而且此处TN的去除率占整个系统TN去除率的65%以上,这也证实了本工艺通过内部结构的设置实现了硝化液的回流,NO_x-N在向缺氧单元扩散的过程中实现了反硝化.

鉴于上述分析,系统内曝气量的大小,直接影响着好氧单元填料的挂膜情况及生物膜内缺氧微环境的形成,此外曝气的扰动作用对硝化液的回流也有影响.由此,系统在通过多种途径实现脱氮的过程中,优化缺氧好氧交界处的工艺设计以及寻求适宜的操作条件是今后在工艺的放大设计和运行中需进一步研究的内容.

3 HMBR 的处理效果

当系统温度为25℃左右,进水pH值为6.1~7.0,好氧单元的DO质量浓度为1.0~1.5 mg/L,曝气量为0.04~0.05 m³/h时,HMBR对模拟小区污水的处理效果为:出水COD的平均值为16.46 mg/L(27.32~7.87 mg/L)、BOD₅为0.70 mg/L(1.38~0.28 mg/L)、NH₄⁺-N为0.11 mg/L(0.33~0 mg/L)、TN为6.76 mg/L(8.38~3.79 mg/L);平均去除率分别为94.5%、99.3%、99.4%和84.7%,且膜出水中检测不出SS和大肠菌群,浊度<2 NTU.

在二级处理单元之后增设膜分离单元,能够实现污水的回用,经消毒处理后,可用于冲厕、小区绿化、扫除、洗车等场合.HMBR的出水水质和

CJ 25.1 - 89《生活杂用水水质标准》主要项目的对比情况见表 2.

表 2 HMBR 出水水质和生活杂用水水质标准主要项目的对比

Table 2 Water quality comparison between HMBR effluent and Miscellaneous Domestic Water

	$\frac{\text{COD}}{\text{mg L}^{-1}}$	$\frac{\text{BOD}_5}{\text{mg L}^{-1}}$	$\frac{\text{NH}_4^+ - \text{N}}{\text{mg L}^{-1}}$	$\frac{\text{SS}}{\text{mg L}^{-1}}$	浊度 NTU	总大肠菌群 个 L^{-1}	pH	嗅
冲厕、绿化	50	10	20	10	化	3	6.5~9.0	无不快感觉
洗车、扫除	50	10	10	5	5	3	6.5~9.0	无不快感觉
HMBR 出水	<30	<2	<1	未检出	<2	未检出	7~8	无异常

试验期间还对 HMBR 对磷的去除效果进行了分析. 磷的去除是通过聚磷菌(如 *Acinetobacter*)过量地从外部环境中摄入 H_3PO_4 , 一部分用以合成 ATP, 另一部分则以多磷酸盐(聚磷)的形式贮存在细胞内, 通过污泥的排放实现磷的去除. 试验初期, 随着污泥的快速增长, 系统对 TP 有一定的去除(细菌用以进行生物合成, 平均去除率为 20%左右); 当污泥浓度基本稳定以后, 系统对 TP 的去除开始下降, 由于试验期间没有进行排泥操作, 故 TP 并没有从系统中最终去除.

为了降低能耗, 膜分离采用低压运行方式, 膜依靠静水压差出水. 整个试验期间(5 个多月), 膜的静水压差由初始的 67 cm 上升到 112 cm, 增加了 45 cm, 压力上升 4.5 kPa. 因此未对膜进行化学清洗. 可见将膜组件与生物反应器分开设置, 膜组件的工作环境较好, 污染程度较轻; 此外空曝气的运行方式也有效地缓解了膜污染, 延长了膜的工作周期.

4 污泥的排放问题

MBR 以膜的高效截留作用, 使得反应器内有着较高的污泥浓度. 但随着 SRT 的延长, 污泥浓度不断增加, 达到一定程度后则会因营养的极度贫乏导致微生物的大量死亡, 产生大量不可生物降解的细胞残留物质; 同时随着微生物内源呼吸的加剧, 又会产生大量的溶解性微生物代谢产物(SMP, Soluble Metabolic Products), 从而对有机物和氨氮的去除产生负面影响^[6]. 因此在实际的运行过程中, 应对 MBR 进行排泥操作, 将污泥浓度控制在一定的范围内, 防止污泥老化.

HMBR 工艺结合了淹没式生物膜工艺与 MBR 的特点. 淹没式生物膜工艺的剩余污泥产量仅为常规活性污泥法的 $1/10 \sim 1/5$ ^[7]. 这主要是由于在填料上吸附生长的生物膜形成了由菌、藻、原生动物及后生动物(如轮虫、线虫)组成的较长的食物链, 能维持生物膜的平衡, 减少剩余污泥产量. 在 5 个多月的试验过程中,

除取样外, 未进行排泥操作, 这也证实了 HMBR 工艺具有剩余污泥量少的优点.

5 结论

(1) HMBR 的处理效果受温度、pH 值、DO 等环境因素的影响.

(2) HMBR 通过内部自身结构的设置, 实现了污泥和硝化液的自动回流, 解决了传统 A/O 工艺因污泥和硝化液回流设备复杂及运行费用较高的问题, 在简化系统的同时, 降低了运行费用, 提高了处理效果.

(3) HMBR 工艺以其优质稳定的出水, 较少的剩余污泥产量, 运行管理简单和节能等优点, 在小区污水处理和回用中将具有良好的工程应用前景.

参考文献:

- [1] YASUTOSHI S, YU - ICHI O, KATSUSHI U, *et al.* Filtration characteristics of hollow fiber microfiltration membranes used in membrane bioreactor for domestic wastewater treatment [J]. *Wat Res*, 1998, 30(10): 23 - 27.
- [2] GUNDER P. Replacement of secondary clarification by membrane separation results with plate and hollow fiber modules [J]. *Wat Sci Tech*, 1998, 38(4/5): 383 - 393.
- [3] 郑祥, 刘俊新. 膜生物反应器的技术经济分析[J]. *给水排水*, 2002, 28(3): 105 - 107.
- [4] 张统. CASS 工艺处理小区污水及中水回用[J]. *给水排水*, 2001, 27(7): 64 - 66.
- [5] 白晓慧. 污水生物脱氮除磷革新技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨建筑大学, 1999.
- [6] 邹联沛, 王宝贞, 范延臻, 等. SRT 对膜生物反应器出水水质的影响研究[J]. *中国给水排水*, 2000, 16(7): 16 - 18.
- [7] WANG B Z. A study on simultaneous organic and nitrogen removal by extended aeration submerged biofilm process [J]. *Wat Sci Tech*, 1991, 24(5): 197 - 214.

(编辑 刘彤)