

无粪便生活污水 SMBR 快速处理技术*

卓君臣^{1,3,*} 李培军¹ 李亮²

(¹ 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016 ;² 东北大学资源与土木工程学院, 沈阳 110014 ;³ 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 针对传统生活污水水质相对复杂, 处理与回用较为困难的问题, 提出在收集时排除粪便水, 选择厨房、洗漱、洗澡、洗涤的污水, 利用浸没式膜生物反应器(SMBR)技术实现无粪便污水的快速处理, 再生水回用于冲厕。结果表明: 此种污水 COD、NH₄⁺-N 和 TP 含量低, 具有良好的可生化性, 可大大降低处理周期与处理成本。本技术优化的主要工艺条件为: 污泥浓度范围 7000 ~ 9100 mg · L⁻¹, 污泥龄(SRT) 40 ~ 55 d, 水力停留时间(HRT) 为 80 min, 气水比为 12 ~ 15, 处理效果好, 微滤膜对稳定出水水质起到重要作用。在此条件下, COD、NH₄⁺-N 和 TP 去除率分别为 85.5%、53.1% 和 44.9%。出水 COD 在 20 ~ 30 mg · L⁻¹, BOD₅ 为 1 ~ 5 mg · L⁻¹, NH₄⁺-N 为 2 ~ 3.08 mg · L⁻¹, TP 为 0.59 ~ 0.9 mg · L⁻¹, LAS 为 0.41 ~ 0.67 mg · L⁻¹, 去除效果较好, 再生水水质可达到《城市污水再生利用城市杂用水水质》(GB/T 18920-2002) 标准。

关键词 浸没式膜生物反应器; 水力停留时间; 污泥特性; 气水比

中图分类号 X703.1 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2009)10-2153-06

Submerged membrane bioreactor: A quick treatment technology for non-fecal domestic sewage. ZHUO Jun-chen^{1,3}, LI Pei-jun¹, LI Liang²(¹Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; ²School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; ³Graduate University of Academy of Sciences, Beijing 100049, China). *Chinese Journal of Ecology* 2009 28(10) 2153-2158.

Abstract: Aiming at the relative complexity of conventional domestic sewage water and the difficulties in treating and recycling this kind of water, an advanced treatment of domestic wastewater drained from kitchen, shower, and rinse but not from lavatory was processed. By adjusting the hydraulic retention time (HRT) and the aeration amount of submerged membrane bioreactor (SMBR), a set of feasible option of technical parameters was determined to keep the system in steady-state. When the treatment was conducted under the optimum operation conditions of HRT 80 minute and air/water ratio 12-15, MLSS 7000-9100 mg · L⁻¹, and solid retention time (SRT) about 40-55 d, the removal rate of COD, NH₄⁺-N, and total P was 85.5%, 53.1%, and 44.9%, and the COD, BOD₅, NH₄⁺-N, total P, and LAS of effluent water were 20-30 mg · L⁻¹, 1-5 mg · L⁻¹, 2-3.08 mg · L⁻¹, 0.59-0.9 mg · L⁻¹, and 0.41-0.67 mg · L⁻¹, respectively, meeting the National Standards for Recycling (GB/T 18920-2002).

Key words: submerged membrane bioreactor (SMBR); hydraulic retention time; sludge characteristics; air/water ratio.

随着我国城市化进程的加快, 城镇生活污水量呈现快速增加的趋势。据预测, 到 2020 年全国居民生活污水排放量将达到 4.75 × 10⁷ m³ · d⁻¹ (韩振宇 2005), 生活污水的处理与再生水回用势在必

行。传统生活污水通常包括厨房水、洗漱(浴)水、洗涤水和冲厕水, 由于各种污水混合后成分复杂, 具有处理难度相对较大、周期长和成本高的特点, 这是生活污水处理后回用的主要限制因素。本文所述新型生活污水是指除冲厕水之外的家庭生活用水(包括厨房水、洗漱、洗澡水、洗涤水等, 以下简称污

* 国家重点基础研究发展计划资助项目(2004CB418506)。

** 通讯作者 E-mail: zhuojc@iae.ac.cn

收稿日期: 2009-02-12 接受日期: 2009-06-23

水)。其主要特点包括:水质相对简单,可生化性好,SS 含量低,且一般可通过物理方法去除; NH_4^+-N 和 TP 含量低,生化反应后即可达到城市污水回用标准,无需考虑硝化、反硝化脱氮和除磷过程,因而可大大降低处理周期与费用。将此类生活污水收集后集中处理为中水的有效、低成本回用提供了一种新的思路,对于解决城镇水污染与水资源短缺问题具有重要意义。从可行性上讲,城镇家庭冲厕水水量约占家庭生活污水的 30%~40%,因此将无粪便污水单独收集处理后回用几乎可以无需清水补充就可以实现中水冲厕;目前生活污水处理后回用的较大障碍就是回用成本较高,而无粪便生活污水由于处理工艺简单,周期缩短,据初步估算水处理成本预计可降低 30%~40%,建设投资成本增加 20%,总回用成本依然有 10%~20% 的下降空间。随着水资源的日趋紧张,水价的不断上涨,国家政策的扶持,无粪便污水处理后回用将具有良好的前景。

膜生物反应器(membrane bioreactor)的研究始于 20 世纪 60 年代的美国,是一种将传统的生物处理工艺与膜分离技术相结合的污水处理技术(金兆丰和余志荣,2003),它以膜分离过程代替了传统活性污泥法中的重力沉降实现固液分离的过程。MBR 主要特点有固液分离效率高、对滤出水具有消毒作用、较高的活性污泥浓度、较长的污泥停留时间(SRT)和污泥剩余量少、出水水质好等(Leiknes & Ødegaard,2007)。因此,MBR 反应器被应用于各种污水如城镇污水、工业废水等领域中以削减 COD 和 N、P。MBR 应用最主要的技术障碍是由于膜污染导致过滤膜的通量快速降低(Meng *et al.*,2007),需要消耗较高的能量定期对膜进行清洗。污泥生理特性如溶解性微生物产物(SMP)、胞外聚合物(EPS)、碳水化合物和蛋白质则是影响 MBR 性能的主要因素(Lee *et al.*,2003;Massé *et al.*,2006;Yigit *et al.*,2008)。由于反应器中既包含活跃的微生物又有其代谢产物的系统,因此,操作工艺条件对微生物群落和膜通量有重要影响,通过控制合适的工艺条件可提高出水水质,减缓膜污染速度,提高污水处理效

率。将膜生物反应器应用于无粪便生活污水处理至今未见报道。本研究以自制 MBR 反应器,确定水力停留时间(HRT)、污泥龄(SRT)、污泥浓度(MLSS)、气水比等工艺参数,为生活污水低成本回用提供参考。基于污水处理后回用于冲厕的目的,本文出水水质目标为国家相关再生水回用标准。

1 实验装置及方法

1.1 实验装置

膜生物反应器由有机玻璃制成,有效容积 40 L。微滤膜组件材料为聚偏氟乙烯(PVDF),膜孔径为 0.1 μm ,膜面积 0.2 m^2 ,放置 4 组浸没于反应器中。填料为多面球形填料,材料为聚丙烯,直径为 38 mm,比表面积 325 $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ 。

反应器构造如图 1 所示。

1.2 实验用水

首先收集 5 个家庭厨房水、洗漱、洗澡水、洗涤污水,按照实际使用比例混合即得到所述污水。实际收集污水主要用于最初工艺研究与 SS 去除实验。由于此类污水收集上较困难,因此大量实验用水根据上述收集污水测得指标进行人工配制,原料为葡萄糖、氯化钙、磷酸二氢钾、硫酸镁、氯化铵、硫酸亚铁、碳酸氢钠。原水水质指标如表 1,其污染指标同实际收集的污水基本相同。

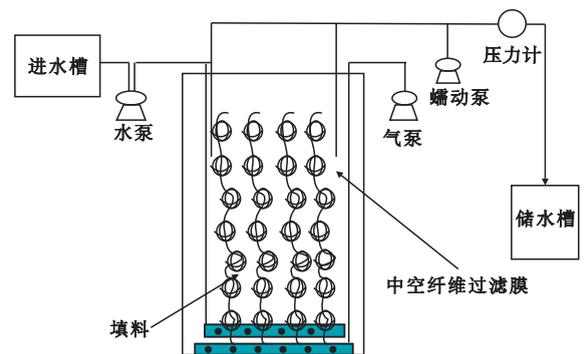


图 1 SMBR 反应器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the SMBR set-up

表 1 实验原水水质参数对比

Tab. 1 Comparison of characteristics of wastewater

水质	COD ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	BOD ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	NH_4^+-N ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TP ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	LAS ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	pH	温度($^{\circ}\text{C}$)
传统	220~610	150~300	17~35	3~5			
本实验	122~189	48~75	4~7	1.1~2.1	1.21~1.87	6.2~7.5	18~28

1.3 反应器的启动

挂膜用活性污泥取自沈阳北部污水处理厂,投入反应器,连续曝气,初始进水浓度为 $400 \sim 460 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,采用排泥法进行挂膜,反应器运行大约 5 d 后,填料逐渐出现淡黄色薄膜,进行到 11 d 时,膜厚度接近 0.5 mm,监测出水 COD 去除率均 $> 55\%$ (3 次测定 COD,平均去除率为 61.2%),证明挂膜成功(俞汉青和顾国维,1992)。

1.4 分析项目及方法

实验中 COD 用重铬酸钾法、BOD 用稀释接种法、DO 用 9010 便携式溶氧仪测定、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TP 用流动注射法进行测定。

2 工艺参数选择

2.1 水力停留时间对 COD 的去除效果影响

HRT 是污水生物处理系统的一个重要参数,它不仅与系统的处理效率相关,而且还对微生物群落组成有直接影响,同时直接决定了生物反应器容积的大小,进而影响到处理成本(袁丽梅等,2007)。由于反应器内污泥浓度与混合污泥沉淀后的上清液(以下简称上清液)相关(金若菲等,2004),同时为了比较膜过滤对于负荷的去除贡献率,实验中除测定膜出水外,还测定上清液 COD 浓度。

改变 HRT,在其他条件不变的情况下,测定在不同 HRT 下有机物的去除效果。考虑到有机负荷较低,选取 HRT 分别为 30、40、60、80 和 120 min 进行去除效果实验(图 2)。由图 2 可以看出,随着 HRT 的缓慢增加,上清液与膜出水 COD 去除率逐渐升高,当 HRT 为 60 min 时,COD 分别为 40.5 和 $26.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,去除率分别为 70.9% 和 81.3%,此时出水 COD 已达到生活污水的中水回用标准。继

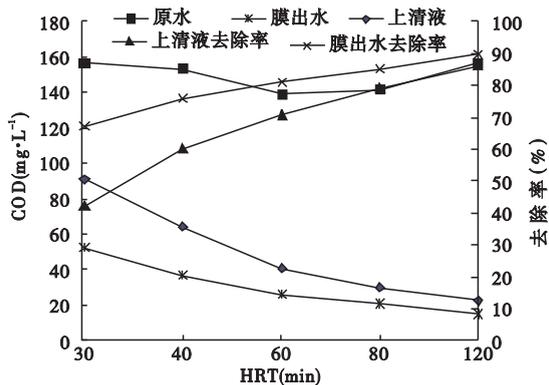


图 2 不同 HRT 对 COD 的去除效果

Fig. 2 COD removal efficiency in different HRT

续增加到 80 min 时,出水 COD 分别为 30.08 和 $20.47 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,去除率为 78.7% 和 85.5%。从经济角度考虑,较低的 HRT 可以减小反应器容积,但是,HRT 为 60 min 时,污水处理后虽然已经达到回用标准,但由污泥负荷公式(高廷耀和顾国维,1999):

$$N_s = q_v \rho_{s0} / \rho_x v$$

式中: N_s 为污泥负荷率; q_v 为与曝气时间相当的平均进水流量; ρ_{s0} 为曝气池进水的平均 BOD 值; ρ_x 为曝气池中的污泥浓度。

当污泥浓度为 $7000 \sim 9100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,污泥负荷在 $0.32 \sim 0.62 \text{ kg COD} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ MLSS} \cdot \text{d}^{-1}$,污泥负荷偏高,会产生较多的剩余污泥且易发生污泥膨胀,尽管 MBR 中污泥膨胀在一定程度上对 COD 去除效果无明显影响,但会加剧膜污染,严重影响膜通量(傅金祥等,2005),因此选定 HRT 为 80 min 为宜,此时污泥负荷约在 $0.24 \sim 0.46 \text{ kg COD} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ MLSS} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

2.2 气水比对 COD 的去除效果影响

好氧处理工艺中充氧的能耗占总运行费用的 60%~70%(许航等,2007)。MBR 中曝气是能耗的主要部分,优化曝气量的研究就显得尤为重要。曝气量和曝气位置的精确设计同时也是影响膜污染的关键因素之一(黄霞等,2008)。气量过小,水中 DO 浓度较低,难以维持反应器中微生物的呼吸作用与代谢过程,且无法维持较高的污泥浓度,造成污泥负荷过高,影响污泥性质和出水质量,而气量过高增加成本,且易于将污泥团打碎,形成细小颗粒,造成膜通量下降(Choo *et al.*, 2000)。由于本实验无 N、P 去除要求,无需设置厌氧环境,因此曝气头均匀设置在反应器最底部共 12 个,分 3 组置于膜组件下方,一方面可使气泡充分与填料接触,提高氧利用效率,另一方面可防止污泥沉淀于底部和起到减缓污泥在膜面沉积的作用。工程中通常用气水比作为一个参数侧面反应水中 DO 浓度的大小。气水比对处理系统有 3 个影响:决定水中 DO 大小;对膜的冲刷作用,延缓膜的反冲洗周期;曝气形成错流,使原水与微生物充分混合,促进有机物的去除。因此,气水比大小对成本控制和处理效果均有重要影响。实验中设置 HRT 为 80 min,进水流量为 $30 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$,改变进气量(实验中同时测 DO)即气水比条件对有机物的去除效果见图 3。

由图 3 可见,当气水比为 15 时,去除效果最

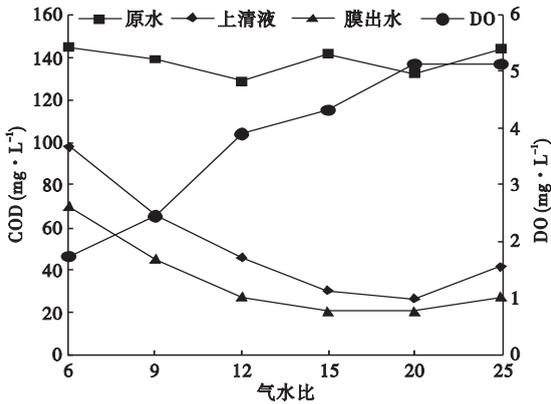


图 3 不同气水比对 COD 的去除效果

Fig. 3 Comparison of COD removal efficiency in air/water ratio

佳,此时 DO 为 $3.89 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,上清液与膜出水 COD 值分别为 45.43 和 $27.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,继续增加曝气量,去除效果增加不明显。值得一提的是,当气水比增加到 20 时,上清液 COD 去除率下降较为明显。经观察发现,此时由于曝气量过大,部分填料的生物膜被冲刷掉,致使反应器中污泥中的活性较高的生物膜量减少,从而降低了系统的去除效率。因此,气水比应控制在 $12 \sim 15$,此时水体溶解氧浓度为 $3.89 \sim 4.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

3 SMBR 污水的处理效果

3.1 SMBR 系统对 COD 的去除

选定 HRT 为 80 min,气水比为 15,温度为 $18 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim 28 \text{ }^{\circ}\text{C}$,pH 在 $6.9 \sim 7.5$,系统运行 1 个月。定期测定原水、膜出水和上清液 COD 浓度,测得结果见图 4。

在 MBR 系统中,较长的污泥龄使得废水中的有机物得到更彻底的矿化分解,且系统中微生物絮团较小,促进了氧和碳的传递效率并可以对进水水质和水量变化有很好的缓冲作用(Massé *et al.*, 2006)。另外,在较长的 SRT 和较低污泥负荷(F/M)下,分散细菌的存在促进了有机物的去除。而过滤膜对于水中溶解态有机分子和胶体的截留,也对有机物的去除起到了一定的作用(Côté *et al.*, 1997)。

由图 4 可见,原水进入系统后,经过污泥和生物膜的吸附、降解过程,上清液中 COD 平均去除率为 75.6%,膜出水中 COD 平均去除率为 85.7%。而膜的过滤对有机物的去除约占 10% 左右,膜的过滤作用对于稳定出水水质起到了重要作用。水中有机物

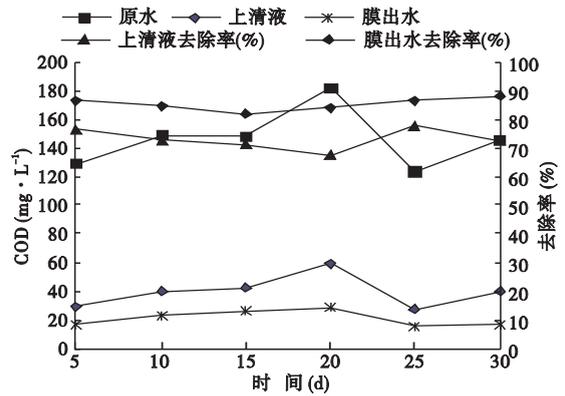


图 4 COD 的去除效果动态

Fig. 4 Dynamics of removal efficiency of COD

可以分为溶解态有机物(DOM)和颗粒态有机物,膜过滤可以过滤大多数颗粒态有机物,而对于 DOM 过滤效果并不佳,但随着实验的进行可以发现,随着运行时间的延长,上清液的 COD 去除效果稳定的情况下,膜出水水质依然略有提高。研究发现,当过滤膜在过滤过程中膜表面形成了饼层和凝胶层,其出现进一步提高了系统对 DOM 和颗粒物的去除效果(Fan & Huang, 2002),与本实验结果一致。实验中 3 次测定出水 BOD_5 平均值为 2, COD、 BOD_5 均达到《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2002)标准。

3.2 SMBR 系统对 NH_4^+-N 和 P 的去除效果

由于实验水中 NH_4^+-N 和 P 的含量较低,本实验未进行详细研究,共测得 6 次(图 5 和图 6)。可以看出,上清液中 NH_4^+-N 和 TP 的平均去除率分别为 52.1% 和 41.2%。膜出水中的 NH_4^+-N 和 TP 的平均去除率分别为 53.1% 和 44.9%。 NH_4^+-N 的去除主要是好氧条件下的微生物的硝化作用,过滤膜对 NH_4^+-N 的去除贡献很小。TP 的去除应主要是被微生物利用转化为细胞物质。

3.3 SMBR 对阴离子洗涤剂(LAS)去除效果

实验中,模拟水中加入洗洁精,以模拟生活水中阴离子洗涤剂。检测进出水 LAS 浓度,得到结果如图 7。由图 7 可知,通过反应器内生物的降解与吸附作用,上清液和膜出水中 LAS 平均降解率分别为 58.7% 和 62.0%,出水 LAS 平均浓度分别为 0.64 和 $0.58 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。而膜的过滤作用对阴离子洗涤剂的过滤效果不明显,贡献率仅为 3% 左右。研究表明, LAS 生物降解的机理是烷基链的甲基的氧化、 β -氧化、芳香环的氧化降解和脱磺化(Schoberl, 1989)。

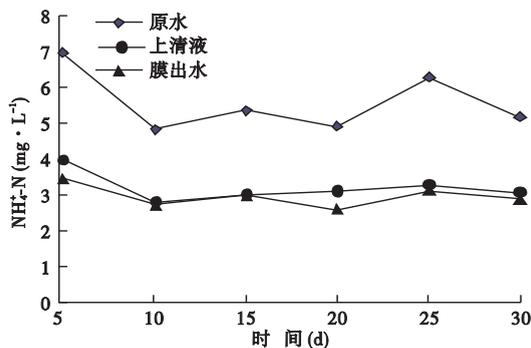
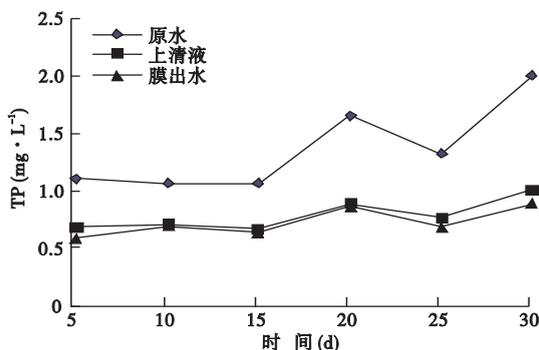
图5 系统对 NH_4^+-N 的去除效率Fig. 5 Removal efficiency of NH_4^+-N 

图6 系统对 TP 的去除效率

Fig. 6 Removal efficiency of TP

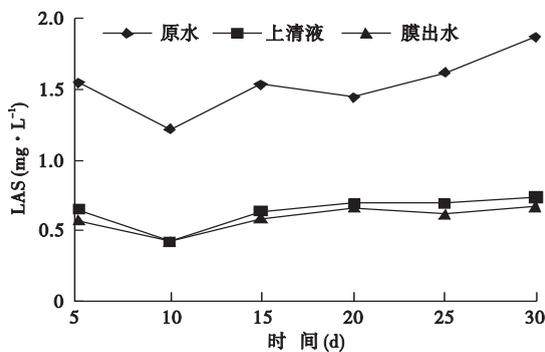


图7 系统对 LAS 的去除效果

Fig. 7 The removal efficiency of LAS

3.4 SMBR 系统的污泥特性

在污泥中,微生物种类繁多主要包括原核生物(细菌)、真核细胞(原生动物、线虫、轮虫等)、病毒等,而细菌占优势,在降解过程中扮演主要角色(Radjenović *et al.*, 2008)。微生物吸收污水中的营养物质而不断繁殖,污泥数量增加,同时部分微生物通过内源呼吸而消亡。较长的污泥龄有利于内源呼吸作用的发生。但过长的污泥龄会降低活性,增加污泥粘度,加快膜污染。因此维持合适的污泥浓度对处理系统来说至关重要,一方面维持一定的污泥

数量和活性从而保证处理能力,另一方面保持一定的微生物的内源呼吸作用,减少剩余污泥产生。本实验在运行过程中没有排泥,泥龄约为 40 ~ 55 d。实验中测得污泥的污泥沉降比(SV)在 26% ~ 34%,污泥浓度为 7000 ~ 9100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。对于浸没式 MBR 系统来说,污泥浓度通常在 15000 ~ 25000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (Côté *et al.*, 1997),而由于本实验中进水有机物浓度较低,过于强调 MLSS 会提高曝气要求,经过实验,宜控制在 7000 ~ 9000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为宜,此时污泥负荷在 0.27 ~ 0.44 $\text{kg COD} \cdot \text{kg}^{-1} \text{MLSS} \cdot \text{d}^{-1}$,剩余污泥量较少,处理效果稳定,基本不发生污泥膨胀。

4 结论

针对无粪便生活污水采用膜生物反应器在技术和经济上是可行的,出水 COD 在 20 ~ 30 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, BOD 为 1 ~ 5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; NH_4^+-N 为 2 ~ 3.08 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TP 为 0.59 ~ 0.90 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, LAS 为 0.41 ~ 0.67 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,出水水质可达到城市回用水水质标准。

实验室内的运行工艺参数为 HRT 80 min,气水比 12 ~ 15, MLSS 为 7000 ~ 9100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, SRT 为 40 ~ 55 d。其中 HRT 和气水比是影响处理效果和成本的重要参数,而 MLSS 的合理选择对系统的处理效果和稳定有重要的参考意义。

由于此种污水较传统污水成分简单,有机物、N、P 含量均较低,无需考虑去除 N、P 的工艺过程,处理工艺简单,反应时间短、流程少,膜污染较传统污水轻。同传统型小区生活污水处理装置相比,处理周期和处理费用均可降低 30% ~ 40% 左右,使家庭与社区生活污水的快速处理与回用成为可能。实施后,可节约家庭生活用水量 40%。

由于该种特定生活污水取样的困难度较高,实验中主要采用人工配制模拟废水,在一定范围内与真实污水可能有一定差异,需在中试中进一步加强研究。

参考文献

- 傅金祥,苏锦明,朴芬淑,等. 2005. 一体式膜生物反应器的污泥膨胀控制. 中国给水排水, 21(4): 46-47.
- 高廷耀,顾国维. 1999. 水污染控制工程. 北京: 高等教育出版社.
- 韩振宇. 2005. 中国 2020 年城市生活污水排放量预测及淡水资源财富 GDP 指标的建立. 环境科学研究, 18(5):

- 88-90.
- 黄霞,曹斌,文湘华,等. 2008. 膜-生物反应器在我国的研究与应用新进展. *环境科学学报*, **28**(3): 416-432.
- 金若菲,周集体,王竞,等. 2004. 膜生物反应器中的生物学特征. *微生物学通报*, **31**(2): 121-125.
- 金兆丰,余志荣. 2003. 污水处理组合工艺及工程实例. 北京: 化学工业出版社.
- 许航,陈卫,程士俊,等. 2007. 气提式接触氧化法处理生活污水的研究. *中国给水排水*, **23**(5): 90-96.
- 俞汉青,顾国维. 1992. 生物膜反应器挂膜方法的试验研究. *中国给水排水*, **8**(3): 13-17.
- 袁丽梅,张传义,张雁秋,等. 2007. 水力停留时间对膜生物反应器复合工艺污水处理特性的影响. *环境污染与防治*, **29**(5): 363-366.
- Choo KH, Kang IJ, Yoon SH, *et al.* 2000. Approaches to membrane fouling control in anaerobic membrane bioreactors. *Water Science & Technology*, **41**: 363-371.
- Côté P, Buisson H, Pound C, *et al.* 1997. Immersed membrane activated sludge for the reuse of municipal wastewater. *Desalination*, **113**: 189-196.
- Fan B, Huang X. 2002. Characteristics of a self-forming dynamic membrane coupled with a bioreactor for municipal wastewater treatment. *Environmental Science & Technology*, **36**: 5245-5251.
- Lee WT, Kang ST, Shin HS. 2003. Sludge characteristics and their contribution to microfiltration in submerged membrane bioreactors. *Journal of Membrane Science*, **216**: 217-227.
- Leiknes T, Ødegaard H. 2007. The development of a biofilm membrane bioreactor. *Desalination*, **202**: 135-143.
- Massé A, Spérandio M, Cabassud C. 2006. Comparison of sludge characteristics and performance of a submerged membrane bioreactor and an activated sludge process at high solids retention time. *Water Research*, **40**: 2405-2415.
- Meng FG, Shi BQ, Yang FL, *et al.* 2007. Effect of hydraulic retention time on membrane fouling and biomass characteristics in submerged membrane bioreactors. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, **30**: 359-367.
- Radjenović J, Matošić M, Mijatović I, *et al.* 2008. Membrane bioreactor (MBR) as an advanced wastewater treatment technology. *Handbook of Environmental Chemistry*, **5**: 37-101.
- Schoberl P. 1989. Basic principles of LAS biodegradation. *Ten-side Surfactants Detergents*, **26**: 86-94.
- Yigit NO, Harman I, Civelekoglu G, *et al.* 2008. Membrane fouling in a pilot-scale submerged membrane bioreactor operated under various conditions. *Desalination*, **231**: 124-132.

作者简介 卓君臣,男,1979年生,硕士研究生,工程师。主要从事环境工程方面研究。E-mail: zhuojc@iae.ac.cn
责任编辑 魏中青
