

膜生物反应器用于居民区生活污水处理与回用

陈洪斌, 李 辰, 刘富强, 戴晓虎

(同济大学 城市污染控制国家工程研究中心, 上海 200092)

摘要:采用缺氧/厌氧-生物膜技术,结合活性炭过滤、紫外线氯消毒的组合工艺深度处理居民区生活污水,分别以冲洗厕所和景观用水为目标,考察再生水的水质状况和主要参数;对比研究以混合生活污水和灰水分别作为中水源的技术和经济适用性.中试研究表明,以居住区生活污水(化粪池出水)作为中水源,运行条件停留时间 8 h、污泥质量浓度 $3\,500\sim7\,500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、出水无色无味,化学需氧量质量浓度低于 $30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,五日生化需氧量质量浓度低于 $3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,氨氮质量浓度低于 $3.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,可以稳定达到杂用水标准,但总氮、总磷浓度无法满足景观用水要求;模拟原污水(化粪池进水)的污染物浓度比例,运行条件为停留时间 10 h、污泥龄 50 d、回流比为 200%、污泥质量浓度 $5\,500\sim6\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、外加聚合铝(有效铝) $4\sim5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,再生水的水质均优于冲厕和景观用水标准.在达到相同的再生水水质条件下,居住区的生活污水混合收集处理比灰水单独收集处理的工艺流程复杂,处理费用比后者高 $0.32\text{ 元}\cdot\text{m}^{-3}$.居民区污水资源化采用何种收集和再生方式不仅要考虑技术经济合理性,还需结合居民区再生水的用途和用水量、当地气候条件等因素综合确定.

关键词:混合收集污水;灰水;中水回用;缺氧/好氧-膜生物反应器;经济性分析

中图分类号: X703.1

文献标志码: A

Membrane Bioreactor Technology for Treatment and Reuse of Mixed Domestic Wastewater from Residential Areas

CHEN Hongbin, LI Chen, LIU Fuqiang, DAI Xiaohu

(National Engineering Research Center for Urban Pollution Control, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A pilot-scale anoxic/oxic membrane bioreactor (AO-MBR) in combination with the activated carbon filter and ultraviolet combined chlorine disinfection devices were installed to treat the mixed domestic wastewater in a residential area in north China. The objectives of the research

were to investigate the reclaimed water qualities and optimize the main operating parameters, furthermore, to analyze the technical and economic suitability for treatment of the mixed domestic wastewater with grey water only. The results show that, when the mixed domestic wastewater (effluent of septic tank) is chosen for treatment, under the conditions of 8 h hydraulic retention time (HRT), mixed liquor suspended solids (ρ_{MLSS}) $3\,500\sim7\,500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, the effluent is colorless and odorless, the chemical oxygen demand (ρ_{COD}), biochemical oxygen demand (ρ_{BOD_5}) and ammonia nitrogen ($\rho_{\text{NH}_3\text{-N}}$) are respectively below $30.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $3.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $3.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, which can stably meet the "GB/T 18920-2002", however, the total nitrogen (ρ_{TN}) and total phosphorus (ρ_{TP}) concentration of effluent can't meet the requirements of "GB/T 18921-2002"; While simulating the $\rho_{\text{COD}}:\rho_{\text{TN}}:\rho_{\text{TP}}$ ratio of the raw wastewater (influent of septic tank), under the conditions of 10 h hydraulic retention time, 50 d sludge retention time, the recycling ratio 200%, ρ_{MLSS} $5\,500\sim6\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, the dosage of poly-aluminum chloride (ρ_{PAC}) $4\sim5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, the effluent quality is better than the "GB/T 18920-2002" and the "GB/T 18921-2002". To achieve the same reclaimed water quality, the mixed domestic wastewater treating process is more complicated than that of the grey water, at the same time, the operating cost is $0.32\text{ Yuan}\cdot\text{m}^{-3}$ higher than the later. Therefore, from view of the economic and technical feasibilities, it should be taken into account the demand and potential usage of the reclaimed water, the local climate conditions during selecting a suitable wastewater collection and treatment system in residential areas.

Key words: mixed domestic wastewater; grey water; water reuse; anoxic/oxic membrane bioreactor; economic analysis

目前中国人均用水量不断减少,污水排放量不断增加^[1-2].我国绝大多数居住区的生活污水混合收集处理后排入城市污水管网,有的小区生活污水进

入城市污水管网之前经过化粪池简单预处理^[3]。以生活污水净化后再生利用具有开源和减少污水排放量的双重效用^[4]。混合生活污水作为中水的水源与优质杂排水(又称“灰水”)相比,污染物较高,病原细菌多,处理后的再生水色度有时偏高,常规处理的水质稳定性难以保障,很多居住区或大型建筑物的再生水系统常发生感官性能差、马桶内的水质变差,甚至发现肉眼可见的蠕虫等现象,导致居民不愿使用再生水。解决居住区生活污水可持续性再生利用难题的思路一方面是将污水源分离,灰水净化后回用于冲厕,一方面采用更加高效可靠的再生技术处理混合收集的生活污水,确保再生水的水质满足长期回用的目的。

膜生物反应器(membrane bioreactor, MBR)用于生活污水再生处理具有诸多优点^[5-6],北美、欧洲、亚洲等地区已有广泛应用^[7]。国内 MBR 中水回用正处于发展和推广应用阶段^[8]。MBR 单独处理生活污水,再生水有时会出现色度偏高的现象。课题组以北方某居民区的化粪池出水作为中水源,将 MBR 与活性炭过滤结合深度处理,再通过紫外线联合氯消毒,中试连续流条件下考察达到生活杂用和景观用水要求的再生水水质和主要参数,根据所确定的工艺与生活污水源分离、灰水 MBR 净化后再生利用的技术经济性进行比较,进而讨论生活污水不同收集处理方式的适用性。

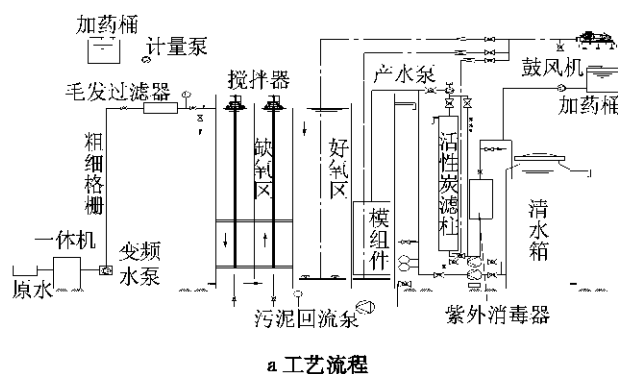
1 材料和方法

1.1 试验水质

中试研究的污水来自北方某城市居住区的化粪池出水,化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)、五日生化需氧量(biochemical oxygen demand, BOD₅)、氨氮(ammonia nitrogen, NH₃-N)、总氮(total nitrogen, TN)、总磷(total phosphorus, TP)等质量浓度分别为 104~397, 35~160, 41.6~75.5, 48.1~86.3 和 2.2~9.9 mg·L⁻¹。春、夏季由于洗浴用水量增加以及化粪池净化效果增强,污染物浓度均比冬季偏低。化粪池进、出水的 COD, TN, TP 的质量浓度比值分别为 42:13:1 和 68:10:1, 试验后期投加碳源模拟化粪池进水则以该比例为参考。

1.2 中试装置的工艺流程和设备

整个中试系统的设计进水量为 1.0~1.5 m³·h⁻¹, 工艺流程如图 1。



a 工艺流程



b 实验装置

图 1 中试装置工艺流程图和实验装置

Fig.1 Schematic diagram of AO-MBR process and experimental devices

化粪池出水经潜水泵提升后,先经过 5 mm 毛发过滤器去除大颗粒悬浮物,再进入 MBR 池。反应池的缺氧段与好氧段体积比为 1:1.5,好氧段被穿孔板隔开分为好氧区和膜区,膜组件采用聚偏二氟乙烯材质,最大过滤水量为 2.7 m³·(m²·h)⁻¹。缺氧/好氧-膜生物反应器(anoxic/oxic-membrane bioreactor, AO-MBR)的运行由可编程逻辑控制器控制,膜组件间歇式出水,抽停时间分别为 9 min 和 3 min,正常运行时每天清水反冲洗 1 min,恢复性清洗则采用化学试剂浸泡法。活性炭滤柱设有超越管,膜组件出水可以直接消毒处理;当膜出水的色度增加时,则采用活性炭处理,以保证出水水质稳定。活性炭滤柱的滤速为 10 m·h⁻¹,运行期间定期采用气水结合方式反冲洗。紫外线消毒装置的最大流量为 3 m³·h⁻¹,照射剂量为 25~38 mJ·cm⁻²,膜出水或炭滤柱出水紫外消毒后投加次氯酸钠,出水进入清水箱。

1.3 取样和分析测试

中试装置运行稳定后每天定时取样,混合后送化验室分析, COD, BOD₅, NH₃-N, TN, TP, MLSS、总大肠杆菌数、总细菌数等均按标准方法^[9]测定; pH 值、温度、溶解氧、色度等均采用便携式测定仪现场测定。

1.4 居住区生活污水混合收集与分类收集以及资源化的经济性分析模型

居住区中水回用经济性计算主要包括管网的投资费用、设备与构筑物投资费用和运行与维修费用3个方面. 其中排水管道和再生水管道等的布置模型采用单元简化模型,与课题组前期研究的灰水收集、再生回用模型相同^[10],见图2.

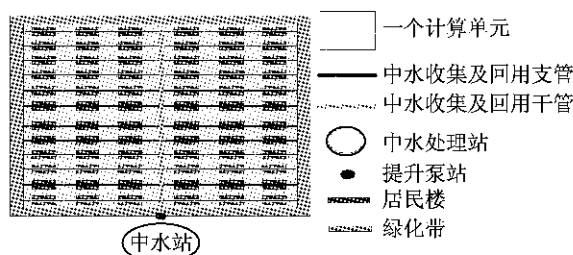


图2 居住区生活污水混合收集与分类收集的单元简化模型
Fig.2 Simplified unit model of residential area for mixed or classified collection

如图2所示,该模型一个单元小区的总面积为500 000 m²,其中绿化面积80 000 m²,共144栋建筑,每栋建筑按5层20户计算,总人口1.15万人,人均居住密度与一线城市相当. 此模型主要用于计算中水回用需要增加的管线、泵站、中水处理站的综合投资费用,管网计算参照公式^[11],设备与构筑物投资费用和运行维修费用参照费用参数^[12]. 设定人均用水量120 L·(人·d)⁻¹^[3],其中收集处理40%回用于家庭冲厕、洗车、小区绿化等. 经济性分析时MBR处理系统的设计水量为750 m³·d⁻¹. 混合污水MBR处理的工艺技术参数和费用测算根据中试结果计算. 灰水MBR处理的计算参考前期研究结果^[10].

2 试验结果与讨论

2.1 以城市杂用水为回用目标的运行结果

居住区中水回用于冲厕、洗车、绿化等杂用的水质按城市杂用水类标准执行^[3].

从图3可以看出,进水COD质量浓度 ρ_{COD} 、NH₃-N质量浓度 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 随季节变化很大,春、夏季(阶段II)进水 ρ_{COD} 、 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 平均值相比冬季(阶段I)分别低100 mg·L⁻¹和6.8 mg·L⁻¹左右,这和居民用水习惯随季节性变化有很大的关系^[13],夏季淋浴和洗衣用水等水量的增加均会造成进水中各项污染物浓度降低. 从运行结果来看,冬季(阶段I)条件下水温10~18℃、水力停留时间 t_{hr} 为

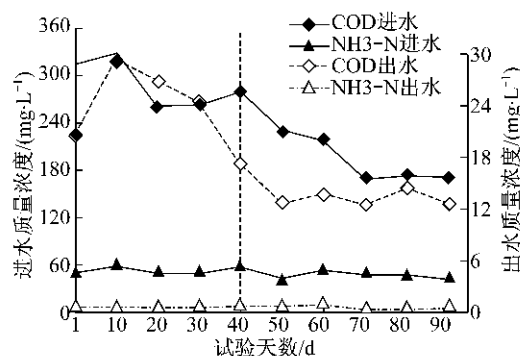


图3 AO-MBR对COD和NH₃-N的去除效果
Fig.3 Removal of COD and NH₃-N in AO-MBR

10 h、污泥龄 t_{sr} 为50 d、回流比为120%、MLSS质量浓度 $\rho_{\text{MLSS}}=6\ 500\sim7\ 500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,膜出水的 ρ_{COD} 低于30 mg·L⁻¹、 ρ_{BOD_5} 低于3 mg·L⁻¹、 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 低于3 mg·L⁻¹、浊度低于0.03 mg·L⁻¹(以SiO₂质量浓度计). 春、夏季(阶段II)运行条件下水温20~30℃、 $t_{\text{hr}}=8\text{ h}$ 、 $t_{\text{sr}}=50\text{ d}$ 、回流比为100%、 $\rho_{\text{MLSS}}=3\ 000\sim5\ 000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,膜出水的 ρ_{COD} 浓度低于15 mg·L⁻¹、 ρ_{BOD_5} 浓度低于2 mg·L⁻¹、 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 低于1.6 mg·L⁻¹、浊度低于0.04 mg·L⁻¹. 可以看出,AO-MBR系统抗冲击负荷能力强,温度对系统影响不大,膜出水可以稳定达到杂用水标准,实际运行可以根据不同季节进水负荷的变化相应地调整停留时间和回流比,发挥系统的最大运行效果.

2.2 以景观用水为回用目标的运行结果

考虑到居民区中水回用达到城市杂用水标准,仅可以作为小区内部循环使用,如需排入河道,补充自然景观用水,则必须达到景观用水标准. 中试装置按照倒置缺氧/厌氧/好氧-膜生物反应器(anoxic/anaerobic/oxic-membrane bioreactor, AAO-MBR)方式运行,膜出水 ρ_{COD} 、 ρ_{BOD_5} 和 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 一直稳定于30,3和3 mg·L⁻¹以下,均可以达到景观用水标准. 由于景观用水标准对 ρ_{TN} 、 ρ_{TP} 要求高,需要进一步控制 t_{hr} 、回流比和 t_{sr} ,以增强脱氮除磷效果.

从图4可见,阶段I(1~40 d)在 $t_{\text{hr}}=10\text{ h}$ 、 $t_{\text{sr}}=50\text{ d}$ 、回流比为200%、 $\rho_{\text{MLSS}}=6\ 500\sim7\ 500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,TN平均去除率为61.4%,膜出水的 ρ_{TN} 介于17.8~29.3 mg·L⁻¹;阶段II(40~120 d)在 $t_{\text{hr}}=10\text{ h}$ 、 $t_{\text{sr}}=50\text{ d}$ 、回流比200%、 $\rho_{\text{MLSS}}=6\ 500\sim7\ 500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,膜出水 ρ_{TN} 在21.1~35.3 mg·L⁻¹,平均去除率为48.4%, ρ_{TN} 均不能满足景观用水标准. 通过增大 t_{hr} 至13 h和降低回流比至100%,对TN去除率影响不大. 可见,进水停留10 h,系统内的反硝

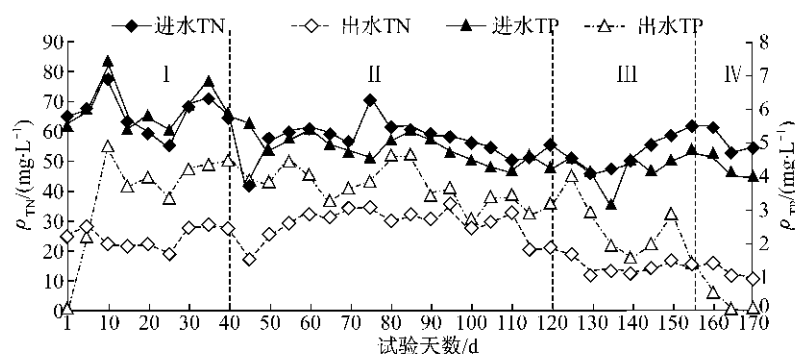


图4 倒置 AAO-MBR 对 TN 和 TP 的去除效果

Fig. 4 Removal of TN and TP in reversed AAO-MBR

化过程基本完成,通过延长缺氧反硝化时间,充分利用内源反硝化碳源来提高系统反硝化效率的空间不大;尽管膜区回流液中高浓度溶解氧(dissolved oxygen, DO)会消耗部分进水的碳源,对脱氮不利,但并不是 TN 去除量不高的主要原因. 夏季(81~120 d)小区化粪池出水的 $\rho_{\text{COD}}/\rho_{\text{TN}}$ 从冬季的 3.5~4.0 降至 3.0,最低时仅有 2.0,相同运行条件下进入夏季以后, TN 平均去除率仅有 45.4%. 李红瑛^[14]在 AO-MBR 处理生活污水的试验中发现, $\rho_{\text{COD}}/\rho_{\text{TN}}$ 要达到 7~9 才能实现很好的脱氮效果. 可见,居住区生活污水资源化利用时,如果以化粪池出水作为进水,存在反硝化碳源不足的问题. 对该居住区的水质调查发现,化粪池进水的 $\rho_{\text{COD}}:\rho_{\text{TN}}:\rho_{\text{TP}}$ 为 68:10:1,阶段 III(121~155 d)开始在进水端投加碳源, $\rho_{\text{COD}}:\rho_{\text{TN}}:\rho_{\text{TP}}$ 调整至 60:15:1,模拟化粪池进水作为中水回用水源,考察系统脱氮除磷效果. 膜出水 ρ_{TN} 逐渐降低至 15.0 mg·L⁻¹ 左右;阶段 IV(156~170 d)进一步外加碳源至 $\rho_{\text{COD}}:\rho_{\text{TN}}:\rho_{\text{TP}}$ 为 63:13:1 时,膜出水 ρ_{TN} 稳定于 15.0 mg·L⁻¹ 以下.

如图 4 所示,在冬季(1~40 d)中试进水的 ρ_{TP} 为 5.6~7.5 mg·L⁻¹,春、夏季(41~170 d)的 ρ_{TP} 降低到 3.5~5.0 mg·L⁻¹;膜出水的 ρ_{TP} 保持在 3.0~4.5 mg·L⁻¹ 之间,平均去除率仅有 29.1%. 一方面由于系统的泥龄过高($t_{\text{sr}}=40\sim50$ d),聚磷菌好氧吸磷之后不能及时地从系统中排出. 曹斌等^[15]在进水 $\rho_{\text{TP}}=2\sim3$ mg·L⁻¹ 时, $t_{\text{sr}}>30$ d 时, TP 几乎没有去除; $t_{\text{sr}}=30$ d 时,出水 $\rho_{\text{TP}}<1.0$ mg·L⁻¹. 另一方面,进水的碳源不足、反硝化菌和除磷菌对于碳源的竞争也是导致系统除磷效果不好的原因. 阶段 III 投加碳源之后,膜出水 TP 的平均去除率提高至 50% 以上,质量浓度降低至 2.0~3.0 mg·L⁻¹,但仍然不能达标. 阶段 IV 在好氧区投加聚合铝(有效铝投加浓度为 4~5 mg·L⁻¹), TP 的去除率达到 98%,质量

浓度降至 0.5 mg·L⁻¹ 以下,稳定达到景观用水标准.

居民区的化粪池虽起到了稳定水量和平衡污染物负荷的作用,但是减少了可利用碳源的数量,难以完全生物脱氮除磷. 从模拟化粪池进水水质作为中水回用水源并结合化学除磷的运行效果来看,运行条件为水温 25~27℃、 $t_{\text{hr}}=10$ h、 $t_{\text{sr}}=50$ d、投加 4~5 mg·L⁻¹ 有效铝,混合液回流比为 200%、 $\rho_{\text{MLSS}}=5\,500\sim6\,000$ mg·L⁻¹ 时,膜出水长期稳定, ρ_{COD} 低于 25 mg·L⁻¹, ρ_{BOD_5} 低于 1 mg·L⁻¹, $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 低于 2.8 mg·L⁻¹, ρ_{TN} 低于 15.0 mg·L⁻¹, ρ_{TP} 低于 0.5 mg·L⁻¹、浊度低于 0.03 mg·L⁻¹,完全符合景观用水要求. 可见,居住区生活污水再生利用如需满足景观用水标准,最好选择不经过化粪池预处理污水作为中水源.

2.3 活性炭过滤的作用探讨

生活污水臭味的来源主要是挥发性有机物和少量无机物,色度主要由粪便水中的胆黄素引起,通过活性污泥法和膜过滤可以去除大部分有机物,但仍有极少部分臭味有机物、显色有机物难降解去除,影响出水的嗅觉和感官效果,长时间停留色度可能会有所加深. 中试采用活性炭滤柱进一步去除膜生物反应器出水的臭味和色度,降低残余的有机物浓度,确保回用水的水质. 如图 5 所示,由于冬季存在 MBR 出水的色度超过 30 度的现象,经活性炭过滤后出水可稳定低于 20 度.

从中试装置连续运行的结果看,膜出水的 ρ_{COD} 和 ρ_{BOD_5} 很低,活性炭过滤柱的进出水的 COD 和 BOD₅ 差异不大,可见,活性炭主要用于保证再生水的色度满足要求,同时也可说明活性炭的使用寿命远高于常规深度工艺. 此外活性炭滤柱中的微生物代谢和反冲洗作用能够在一定程度上实现活性炭再生,还可进一步延长其使用寿命. 一般地,饮用水的

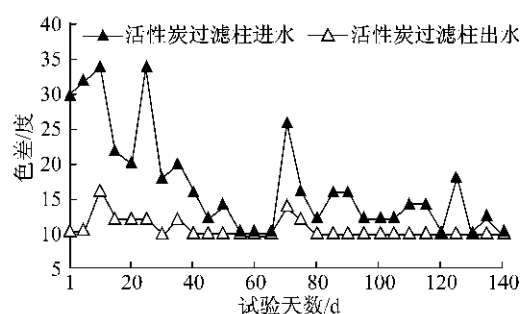


图5 活性炭对色度去除效果

Fig.5 Removal of chrominance in activated carbon filter

活性炭滤池的活性炭寿命可达到3~5年.生活污水采用MBR处理,膜出水后如果接活性炭过滤时,活

性炭的使用寿命取决于活性炭的总过滤水量和过滤速率,若采用常规过滤方式,其寿命应可达到2~3年.生活污水采用MBR处理后的出水如活性炭过滤会增加投资费用和运行费用,工程应用时可设置超越管,根据膜出水的色度和有机物去除效果选择是否运行活性炭滤池,从而降低运行费用.

2.4 紫外联合氯消毒装置运行效果

杀灭再生水水中的细菌、大肠杆菌和虫卵可以有效控制回用过程中可能带来的健康风险^[16].化学消毒难以杀灭的病原体采用紫外线消毒,大都能在几秒或几十秒内杀灭^[17].为保证再生水的水质稳定,紫外线消毒后加次氯酸钠消毒.表1和图6反映了紫外化合氯消毒效果.

表1 系统不同阶段出水的细菌、大肠杆菌总数变化

Tab.1 Changes of total bacteria and E-coli on different stages

个·mL⁻¹

季节	细菌			大肠杆菌		
	MBR出水	活性炭出水	紫外消毒出水	膜出水	活性炭出水	紫外消毒出水
夏季	>10 ³	>10 ³	0~62	6	0	0
秋季	7~507	179~537	0	0	0	0

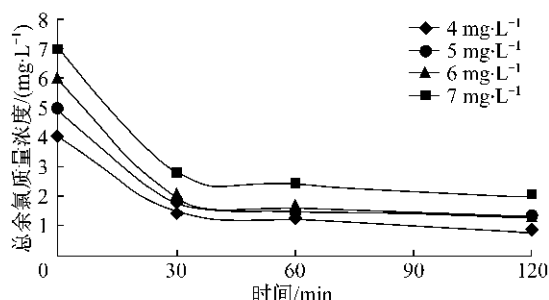


图6 紫外线消毒后投加不同浓度次氯酸钠后的水中余氯变化趋势

Fig.6 Changes of residual chlorine with different sodium hypochlorite dosing quantities

从表1可以看出,MBR出水的细菌含量在夏季比秋季高,活性炭具有滋生细菌的作用.与细菌相比,大肠杆菌的个体较大,大约为0.5~3.0 μm,超滤纤维膜孔径为0.02 μm,对其有明显的截留作用,膜出水中基本不含大肠杆菌.紫外线的照射剂量为25~38 mJ·cm⁻²,出水无大肠杆菌检出,偶尔会出现少量细菌,其细菌杀灭率、大肠杆菌杀灭率均达到99%以上.张永吉、王俊娇等^[18-19]研究认为,水质条件良好的情况下,紫外剂量为10 mJ·cm⁻²时即可满足细菌灭活效果.现场中试紫外消毒装置连续运行7 500 h之后紫外光强度仍未出现衰退,运行结束后检查发现石英套管表面也未出现结垢及藻类滋生现象.由此表明,MBR出水以及活性炭出水对于浊

度和有机物的截留、去除作用减轻了紫外消毒装置的维护和清洗费用.

虽然紫外线具有较强的杀菌能力,但是其杀菌没有延时性,无法保证出水在管网中的生物安全性,因此在紫外消毒装置之后必须辅以加氯装置.由图6可以看出,在紫外线消毒装置后的出水中按照4~5 mg·L⁻¹有效氯投加时,30 min后中水的总余氯质量浓度高于1.0 mg·L⁻¹,2 h后中水的总余氯(用以代表管网末端)仍超过0.5 mg·L⁻¹,满足杂用水和景观用水的要求.

2.5 居住区污水不同收集方式对比分析

居民区生活污水混合收集处理和灰水单独收集的工艺流程分别为:混合污水—格栅—调节池—AO-MBR—活性炭滤柱—紫外加氯—中水储水池—中水供水管网;收集管网—灰水—格栅—调节池—MBR—紫外加氯—中水储水池—中水供水管网.对于居民区污水不同收集方式的处理回用成本分析,涉及工艺参数计算,均参照中试结果,两者 t_{hm} 分别为8 h和4 h,总曝气需求量分别为13.3和10.5 m³·min⁻¹;关于居民区模型、处理水量、构筑物构造、设备选型、安装以及其他工程费用均按照相同方式计算^[10].

其投资运行费用如表2所示.居民区生活污水混合收集的中水系统无需单独设置分类收集管网,相比较灰水单独收集方式,节省了管网费用.处理系

表 2 污水不同收集方式的回用成本

Tab.2 Treatment costs of different collective model

收集方式	管网投资费用/(元·(m ³ ·d ⁻¹) ⁻¹)		处理系统投资费用/ (元·(m ³ ·d ⁻¹) ⁻¹)	运行成本核算/(元·m ⁻³)	
	收集管网	供给管网		不含折旧	含折旧
灰水	2 499	1 925	3 920	0.92	3.06
混合污水	0	1 925	3 947	1.24	3.07

注:两种收集方式的污水处理膜材料均选用纤维超滤膜。土建、设备、管网、膜材料折旧时间分别按照 30 年、10 年、15 年和 4 年计算。

统投资费用主要包括构筑物投资和设备购置、安装费用,两种收集方式相差不大。由于灰水水质优良,污染物浓度低,且不含病原微生物,灰水生化处理的停留时间比混合污水短,无需脱氮除磷,反应池体积相应减小,但是由于灰水水量变化大、不稳定,设计调节池体积较大,而混合污水处理工艺需要增加活性炭滤池,两者构筑物投资估算的差别并不大。至于设备选型与处理量相关性较高,受水质影响较小,故设备费用也基本相同。从运行成本来看,不含折旧费灰水处理系统的运行费用仅需 0.92 元·m⁻³,而生活污水混合收集处理的运行费用为 1.24 元·m⁻³,比前者高 0.32 元·m⁻³;算上折旧费之后由于管网费用所占比例较大,两者运行费用相当,分别为 3.06 和 3.07 元·m⁻³,处理灰水所体现的经济性优势并不明显,但相比较目前全国大中型城市的水价仍有优势。中水回用所体现经济效益不仅仅节省了自来水使用费,还减少了排污费用。由于目前自来水费是将清洁水费和排污费合并收取,如果对于使用中水回用的家庭不收取或者少收取排污费用,则中水回用的经济效益更加显著。

灰水水质较好、处理难度小,中水回用系统工艺简单,造价低,运行成本低,具有明显的经济优势,但是需要单独铺设灰水收集管道。生活污水混合收集的污染物浓度高,且含有病原微生物,中水回用系统工艺更复杂,运行成本高,但是不需要单独铺设收集管道,其水量充足稳定,回用比例高,除回用以外还可以补充景观用水。因此,在小区实际选择回用方式时不仅仅要考虑经济性,还需要结合小区用水量、处理标准、地区雨水量以及当地政策等各方面因素综合考虑。

3 结论

(1) AO-MBR 组合工艺对居民区混合污水具有良好的去除效果,MBR 出水的 ρ_{COD} , ρ_{BOD_5} , $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 、浊度分别降低至 30, 3, 3.0 和 0.03 mg·L⁻¹ 以下,出水水质稳定达到城市杂用水标准。

(2) 以化粪池出水作为中水回用水源采用 AO-MBR 处理,生物脱氮除磷的碳源不足。模拟化粪池进水作为中水回用水源,当 $\rho_{\text{COD}} : \rho_{\text{TN}} : \rho_{\text{TP}}$ 为 63 : 13 : 1 时,MBR 出水的 ρ_{TN} 稳定于 15.0 mg·L⁻¹ 以下;投加聚合铝后,出水 ρ_{TP} 降至 0.5 mg·L⁻¹ 以下,出水水质稳定达到景观用水标准。

(3) MBR 出水采用活性炭过滤可以进一步去除微量有机物,确保出水的色度低于 20 度,但活性炭出水存在细菌滋生现象,且投资运行费用有所增加。紫外线消毒的剂量为 25~38 mJ·cm⁻² 时,对细菌、大肠杆菌杀灭率均达到 99% 以上;进一步投加有效氯 4~5 mg·L⁻¹,30 min 后总余氯质量浓度超过 1.0 mg·L⁻¹,可在一定时间内控制再生水的微生物再生长。

(4) 居民区以灰水作为水源深度处理回用的运行费用比混合收集处理低 0.32 元·m⁻³,但是生活污水混合收集具有水量稳定、节省收集管网费用等特点。在保证回用水水质的前提下,可根据地区实际情况选择不同的生活污水收集和回用模式。

参考文献:

- [1] YI Lili, JIAO Wentao, CHEN Xiaoning, et al. An overview of reclaimed water reuse in China[J]. Journal of Environmental Science—China, 2011, 23(10): 1585.
- [2] ZHANG Jie, CAO Xiangsheng, MENG Xuezheng. Sustainable urban sewerage system and its application in China[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2007, 51(2): 284.
- [3] 孙玉林,王冠军,萧正辉,等. GB 50336—2002 建筑中水设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2003.
SUN Yunlin, WANG Guanjun, XIAO Zhenghui, et al. GB50336—2002 Design standards of reclaimed water for buildings[S]. Beijing: China Planning Press, 2003.
- [4] Yang Hong, Abbaspour C Karim. Analysis of wastewater reuse potential in Beijing[J]. Desalination, 2007, 212(1/3): 238.
- [5] REN Nanqi, YAN Xianfeng, CHEN Zhaobo, et al. Feasibility and simulation model of a pilot scale membrane bioreactor for wastewater treatment and reuse from Chinese traditional medicine[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19(2): 129.

(下转第 288 页)