



文章栏目：面向减污降碳协同增效的污水处理系统运行管理研究与实践专题

DOI 10.12030/j.cjee.202302103 中图分类号 X703.1 文献标识码 A

王启宾, 张艺磊, 常风民, 等. 基于膜分离的原污水碳源浓缩与能量平衡分析[J]. 环境工程学报, 2023, 17(6): 1769-1777. [WANG Qibin, ZHANG Yilei, CHANG Fengmin, et al. Carbon source concentration and energy balance analysis of raw sewage based on membrane separation[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(6): 1769-1777.]

## 基于膜分离的原污水碳源浓缩与能量平衡分析

王启宾<sup>1</sup>, 张艺磊<sup>2</sup>, 常风民<sup>1</sup>, 高志永<sup>2</sup>, 王凯军<sup>1,✉</sup>

1. 清华大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084; 2. 中持水务股份有限公司, 北京 100192

**摘要** 将污水中蕴含大量的有机物收集浓缩转化成甲烷等可利用能源, 是污水资源化利用的重要方式。利用膜分离作用, 将原污水的有机物直接收集浓缩, 并探索最佳运行参数和操作策略。结果表明, 截留有机物停留时间为 3~4 d 较合适, 耗氧污染物 (以 COD 计) 回收率超过 90%。能量平衡分析显示, 通过回收有机物转化为甲烷能量为  $0.0876 \text{ kW}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ , 回收量占总能耗的 33%。中孔纤维膜表面形成的吸附性滤饼层阻止有机物与膜紧密结合, 提高了膜分离效率。进一步解析了膜污染控制机理, 以探索提高耗氧污染物 (以 COD 计) 浓缩效率的优化方案。本研究结果可为污水碳源捕获方法的研究提供参考, 对城市水务行业碳减排工作有积极意义。

**关键词** 市政污水; 碳源浓缩; 能源自给; 膜污染控制

活性污泥法操作简单、运行稳定, 对有机物的去除效率较高, 已被广泛应用于污水处理工艺中。然而, 该工艺曝气环节能耗高, 往往还需要投加大量药剂 (外碳源、除磷剂等), 会造成巨大的能源消耗和温室气体排放。在化石燃料能源危机明显的情况下, 研究者和环保工程师开始重视对工艺的节能减排优化<sup>[1-3]</sup>。在双碳背景下, 研究以节能降耗和资源回收为目标的可持续污水低碳处理技术很有必要<sup>[4-6]</sup>, 并进一步设计绿色的污水处理技术路线<sup>[7]</sup>, 以推动水务行业转型升级。

我国污水处理行业碳排放量占全社会总排放量的 1%~2%<sup>[8]</sup>。污水处理的碳循环设计决定了污水处理厂的能源自给率及碳中和运行的实现<sup>[9]</sup>。由于城市污水中的有机碳源蕴含丰富的化学能和热能, 如何高效提取污水中有机物的方法至关重要。奥地利斯特拉斯 (Strass) 污水处理厂以主流传统工艺 (AB 法) 与侧流现代工艺 (厌氧氨氧化) 相结合处理方式, 最大化回收进水中有机物。在 2002 年之前, 该厂的厌氧消化工艺产出的  $\text{CH}_4$  转化电能最多只能满足该厂约 80% 的用电量。在 2005 年该厂的脱氮工艺改造为自养脱氮工艺 (DEMON) 后, 产  $\text{CH}_4$  后的发电量已超过耗电量<sup>[10]</sup>, 使得该厂成为污水厂碳中和运行的先驱, 为污水处理行业能源回收利用提供了成功范例。然而, 由于该技术的运行过程繁琐, 推广应用较困难。研究者通过化学强化城市污水预浓缩效果, 并将浓缩液经过厌氧消化生成沼气, 亦可作为能源加以利用<sup>[11]</sup>。但该方法需投加大量铁盐和铝盐, 且效率较低。李梅等<sup>[12]</sup>用生物吸附的方法研究了污水预浓缩效果, 活性污泥对有机物吸附量不到  $300 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , 吸附量仍偏小, 后续厌氧消化效率较低。GONG 等<sup>[13]</sup>将污水膜过滤技术应用在污水预处理中, 以实现从污水中回收多种资源, 包括高质量的水、生物能源和有价值的营养素。MEZOHEGYI 等<sup>[14]</sup>

收稿日期: 2023-02-20; 录用日期: 2023-04-24

第一作者: 王启宾 (1983—), 男, 博士, 高级工程师, wangqibin188@163.com; ✉通信作者: 王凯军 (1960—), 博士, 教授, wkj@tsinghua.edu.cn



### 1.3 分析测试方法

1) 水质指标。COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN、MLSS、MLVSS 等指标均按国家水和废水检测分析标准方法测定<sup>[7]</sup>。

2) 膜比通量。膜组件的运行效果采用膜比通量进行表征。即用当前跨膜压差下单位时间、单位膜面积的产水量来表征膜污染程度。通过计算膜清洗前后的膜比通量判断清洗方案是否有效。膜比通量计算公式见式(1)。

$$q = Q / (\text{TMP} \times S) \quad (1)$$

式中： $q$  为膜比通量，L·(h·m<sup>2</sup>·Kpa)<sup>-1</sup>；TMP 为跨膜压差，kPa； $S$  为膜面积，m<sup>2</sup>。

3) 膜浓缩效果评估。通过 COD 平衡计算评估碳源浓缩情况(式(2))，并根据中试装置进水、出水及膜池内的 COD 计算耗氧有机物(以 COD 计)回收效率(式(3)~(5))。反应器池壁及膜丝上泥饼层携带的耗氧有机物(以 COD 计)不考虑。这是由于长期实验中，这部分耗氧有机物(以 COD 计)的量很小，可忽略不计。

$$\Delta \text{COD}_{\text{净}} = (\text{COD}_{\text{inf}} - \text{COD}_{\text{eff}}) \times Q / 1000 \times 24 \times T_1 / T_2 \quad (2)$$

$$\Delta \text{COD}_{\text{T}} = \sum_1^n M_{\text{净}} \quad (3)$$

$$\Delta \text{COD}_{\text{L}} = M_{\text{M}} \times V / 1000 \quad (4)$$

$$R = \Delta \text{COD}_{\text{L}} / \Delta \text{COD}_{\text{T}} \quad (5)$$

式中： $M_{\text{净}}$  为每天净输入耗氧有机物(以 COD 计)的质量，kg； $\text{COD}_{\text{inf}}$ 、 $\text{COD}_{\text{eff}}$  分别为进水、出水 COD，g·m<sup>-3</sup>； $Q$  为抽吸泵流量，m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>； $T_1$  为每个周期抽吸时间，min； $T_2$  为每个周期的总时间，min； $\Delta \text{COD}_{\text{T}}$  为运行时间内累计净输入耗氧有机物(以 COD 计)的质量，kg； $n$  为运行天数，d； $M_{\text{L}}$  为膜池中耗氧有机物(以 COD 计)的质量，kg； $M_{\text{M}}$  为膜池内的 COD 值，mg·L<sup>-1</sup>； $V$  为膜池容积，m<sup>3</sup>； $R$  为耗氧有机物(以 COD 计)的回收率。

## 2 结果与讨论

### 2.1 运行过程中耗氧有机物(以 COD 计)的回收情况

考察了不同工况下膜浓缩反应器中耗氧有机物(以 COD 计)的浓缩情况(图2)。在运行阶段1和阶段2，净累计输入耗氧有机物(以 COD 计)随着膜过滤时间增长而增加。在前72 h，累计回收耗氧有机物(以 COD 计)逐渐增多，并在第72小时达到峰值，且超过90%。随后，耗氧有机物(以 COD 计)的回收率总体呈下降趋势。而至运行阶段3，在前96 h，膜池不排泥，净累计输入及累计回收耗氧有机物(以 COD 计)的量逐渐增多，而回收率有较小幅度降低，由94%降至87%。在总体运行的前96 h，累计回收耗氧有机物(以 COD 计)的量逐渐增多；在运行96 h后，累计回收耗氧有机物(以 COD 计)的量变化不明显。这可能与膜池内存在的微生物有关，在复合阻塞剂与厌氧条件共同作用下，微生物更倾向于矿化溶解性有机物<sup>[3]</sup>，从而导致有机物损失。因此，截留有机物停留时间设置3~4 d为宜。这与JIN等<sup>[2]</sup>发现基本一致，其研究在一个有效容积为3.5 L的反应器中进行，内含膜孔径为0.33 μm的超滤膜。在浓缩进行93 h后，碳源质量浓度高达20 000 mg·L<sup>-1</sup>，碳源回收率约70%。

### 2.2 运行过程中 TMP 变化规律

在膜系统运行中，膜污染程度表现为通量下降或 TMP 升高。在本中试装置中，出水流量为恒流量模式，TMP 的变化情况能直观反映膜污染情况。3个阶段的 TMP 随时间变化情况见图3。阶段1为污水直接过滤阶段。在前1 800 min，TMP 最大不超过5 kPa；在1 800~2 200 min，TMP 呈上



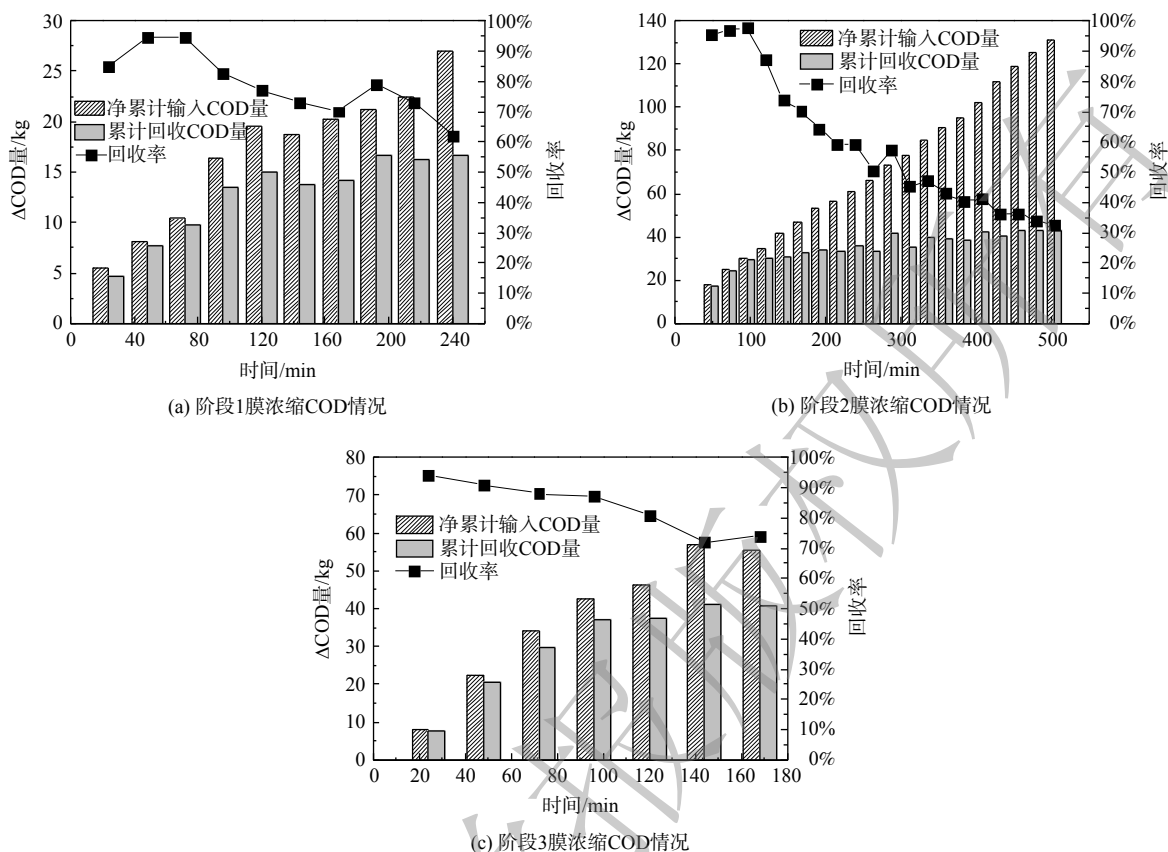


图2 膜系统对COD回收情况

Fig. 2 COD recovery by membrane system

升趋势，最大值不超过 6 kPa。随着过滤的进行，浓缩液的 COD 不断上升，TMP 逐渐升高，最大值接近 30 kPa。而在总体趋势上，TMP 逐渐增大，并出现周期性变化，约 2~3 个周期后，TMP 出现周期性局部最大值。阶段 2 为强化混凝过滤阶段。在初期，TMP 最大不超过 3 kPa。随着过滤的进行，浓缩液的 COD 不断上升，TMP 逐渐升高。在运行 28 800 min 后，TMP 最大值不超过 14 kPa。随着过滤时间增加，TMP 逐渐增大，并出现周期性变化。约 10 个周期后，TMP 出现周期性最大值。在总体变化趋势上，3 个阶段 TMP 均表现为逐渐升高；在过滤周期内，随着过滤时间增加，阶段 1 和阶段 2 的 TMP 均为逐渐升高的趋势。而在阶段 3 的过滤周期内，TMP 变化规律显著不同。当过滤停止时，TMP 迅速降至 5 kPa 以下。在过滤产水的第 1 分钟，TMP 迅速上升，然后 TMP 维持在一个近乎恒定的数值。阶段 3 的膜孔径是阶段 1 的 5 倍。孔径小易被胶体及悬浮物均匀覆盖，泥饼层较密实；而孔径大的膜丝表面易形成稳定的吸附性滤饼层<sup>[1]</sup>，主要由水透过后被截留下来的部分活性污泥、胶体物质和部分浓缩的溶解性有机物组成，堆积在膜表面而形成的可逆性膜面污染。在间歇曝气擦洗和定期排泥的作用下，膜污染显著降低，过水能力有所提高。

### 2.3 过滤特性的变化情况

在污水预浓缩过程中，膜系统膜比通量的变化情况如图 4 所示。在阶段 1 和阶段 2，选取运行最后一天某时间段的膜比通量进行对比分析。在阶段 1，出水量稳定在  $4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ，膜池 COD 为  $4 184 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，膜比通量高值达  $2.4 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa})^{-1}$ 。在过滤抽水周期内，膜比通量逐渐降至约  $0.2 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa})^{-1}$ 。随着过滤时间增加，过滤初期膜比通量高值逐渐降低，膜过滤性能不稳定。在阶段 2，出水量同样稳定在  $4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ，膜池 COD 已高达  $10 680 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，膜比通量高值达  $2.9 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa})^{-1}$ 。在过滤抽水周期内，膜比通量逐渐降至约  $1.0 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa})^{-1}$ ，远高于阶段 1 过滤抽水结束时的膜比

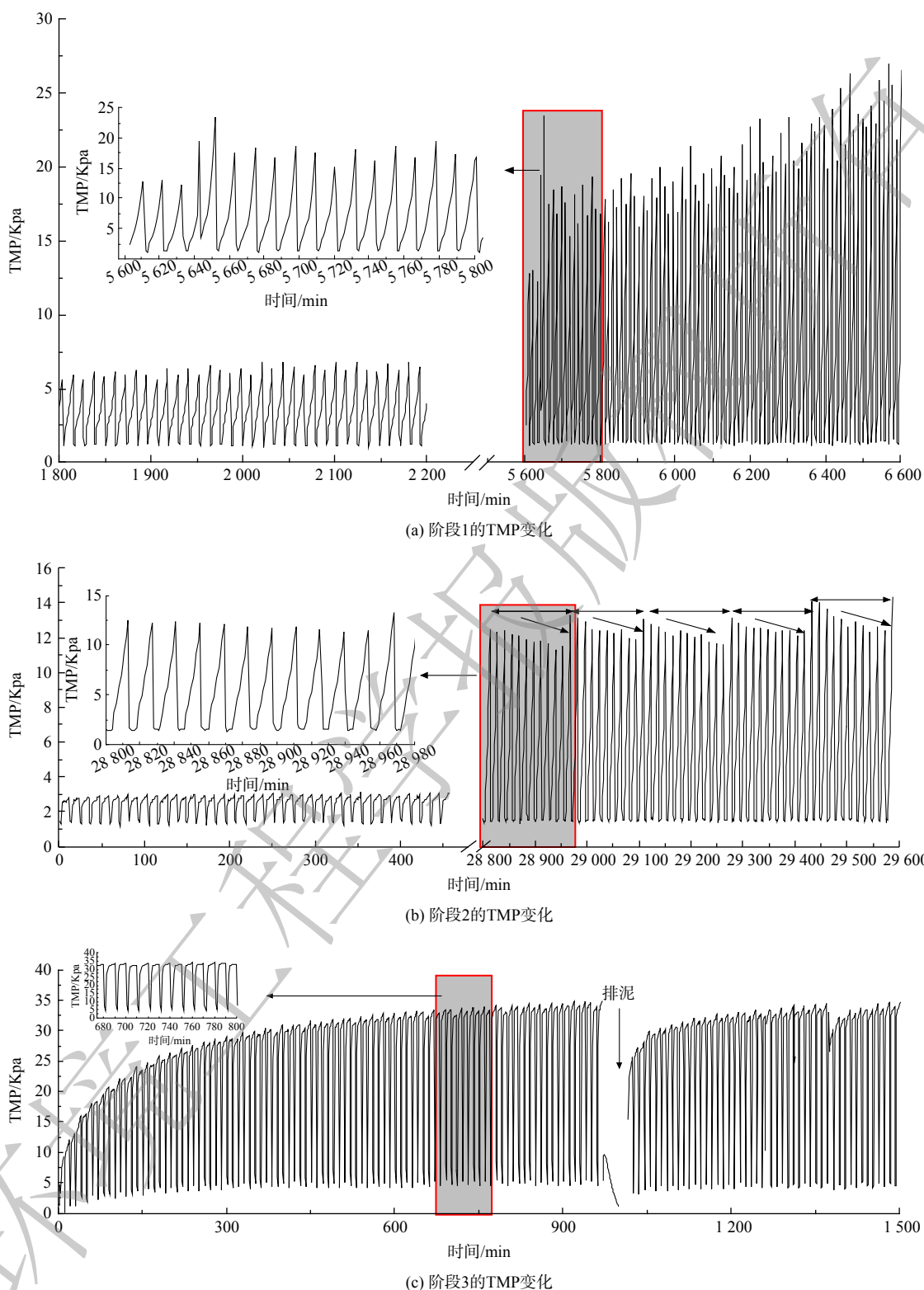


图 3 TMP 随时间的变化情况

Fig. 3 The change of TMP over time

通量值。每个过滤抽水周期初始的膜比通量几乎一样，波动很小，变化规律较一致。这表明在投加复合阻塞剂情况下，膜过滤性能更加稳定。在过滤抽吸周期中，阶段 3 的膜比通量十分稳定。

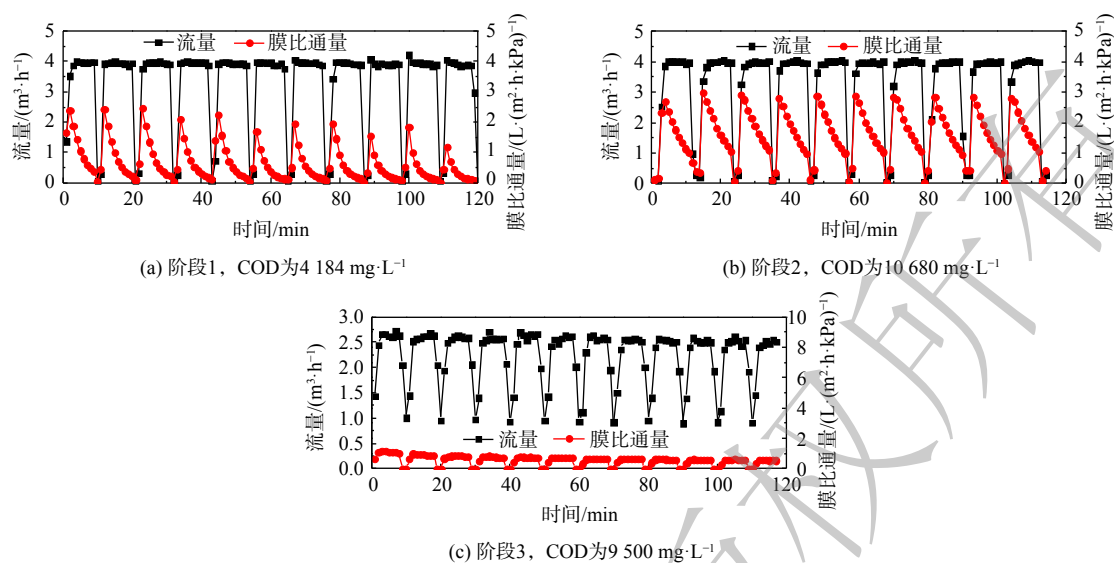


图4 膜比通量变化

Fig. 4 Membrane specific flux variation

以第一个周期为例,  $q$  在  $1.04\sim 1.16\text{ L}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{kPa})^{-1}$  波动, 范围较小。前2个阶段的  $q$  在过滤抽吸周期内呈显著下降趋势。在阶段2和阶段3均有高度规律性的过滤特性, 区别在于阶段2每个过滤周期抽吸水时TMP逐渐增大, 而阶段3每个过滤周期抽吸水时TMP较恒定。这可能是由于大孔径的膜基材在复合阻塞剂的情况下更易形成稳态的吸附性滤饼层, 表现为过滤抽吸过程中膜比通量几乎恒定。

在3个阶段的碳源浓缩过程中, 系统的膜比通量下降趋势有很大的差别。在投加复合阻塞剂的情况下, 即使在高COD情况下, 系统依然有良好的过滤能力, 表现出在不同的运行条件下膜表面滤饼层的特性有显著差异, 而工艺运行参数的改进有助于改善膜浓缩效果。

#### 2.4 膜污染控制原理分析

膜污染问题是影响膜反应器污水处理效率和推广应用的主要因素。为解决污水处理中的膜污染问题, 有必要通过分析膜污染形成机理, 并针对性地提出膜污染控制措施。在实际工程中, 膜污染的程度受到多个因素的影响, 包括膜的特性、泥水混合物的特性及系统维护情况等。而膜污染的多个影响因素并非单独存在, 其相互影响、相互抵抗, 并在综合作用下影响膜通量。在实际应用中, 前2个因素属于固有特性, 可通过在运行控制上采取措施来降低膜污染程度, 尽可能将膜通量恢复至出厂前水平。

传统膜系统污染几乎受所有运行参数的影响。通常, 污泥浓度、胞外聚合物 (extracellular polymeric substance, EPS) 和可溶性微生物产物 (soluble microbial products, SMP) 被认为是影响膜污染的主要因素。EPS是微生物 (主要是细菌) 为抵抗外界压力所分泌的黏性物质<sup>[18]</sup>, EPS的存在与MBR中膜通量的降低、膜污染的产生和比阻的增大都有相关性<sup>[19]</sup>。过高的污泥浓度和较大的污泥负荷, 会造成污泥产生更多EPS和反应器内更高的SMP质量浓度, 进而促进了膜污染过程。本研究反应器水力停留时间比较短, 物化作用远强于生化作用, 可推测出膜池内EPS和SMP的质量浓度较低, 主要污染源来自进水中的有机物。污水中的大分子量有机物以蛋白质和多糖为主, 小分子量有机物以腐殖酸类为主<sup>[4]</sup>。在投加复合阻塞剂之后, 膜池内胶体态和溶解态有机物的脱稳和凝聚, 会使泥水混合液中的絮体疏水性变大, 膜表面形成的吸附性滤饼层会阻止有机物与膜紧密结合, 从而提高了膜分离效率。膜污染的控制原理见图5。

向原水中投加复合阻塞剂, 能作为凝聚核心参与混凝过程, 形成更大粒径及强度, 悬浮物颗

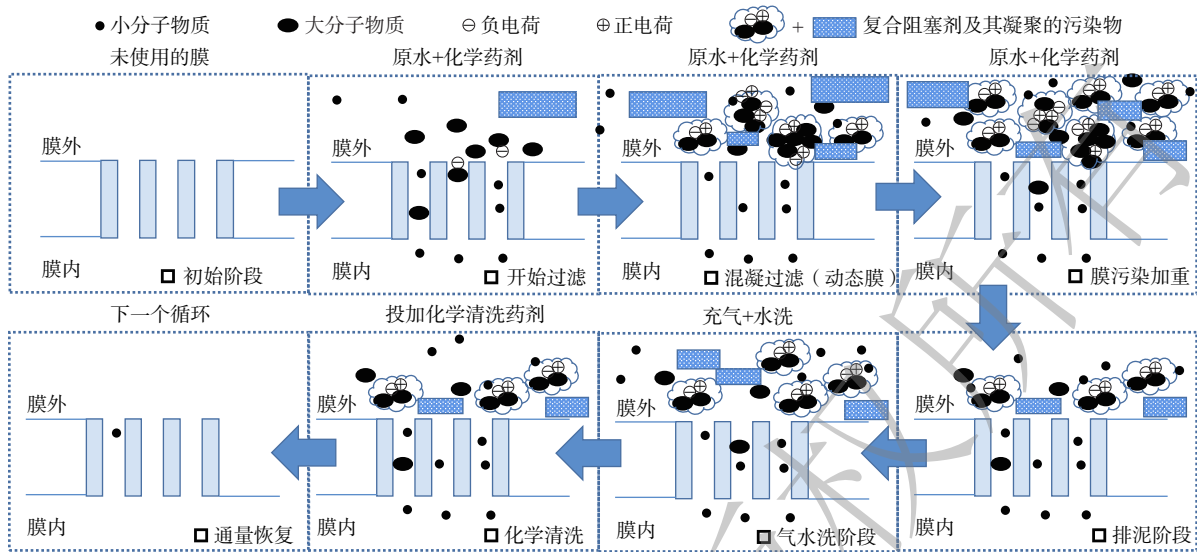


图 5 膜污染控制原理图

Fig. 5 Schematic diagram of membrane pollution control

粒径增大，其絮体分支更多，透水性更好。较大的凝胶团被堆积在膜的表面，膜表面滤饼层的孔隙率更高<sup>[20]</sup>。溶解性小分子有机物被复合阻塞剂的水解产物吸附，通过网捕和卷扫作用，黏附在凝胶团上，故减小了膜内部和外部的阻力，并没有引起膜丝内部污染的明显增加，而延缓了膜污染的发生。随着原水和药剂不断投入到膜池中，膜层表面的滤饼层厚度不断增加，膜污染程度加重，过滤后紧接着曝气擦洗，将膜表面的滤饼层擦洗掉。膜池内悬浮物质量浓度越来越高，过滤过程中滤饼层加厚，膜污染程度加重。通过脉冲曝气擦洗，将滤饼层从膜表面抖落下来，能减轻膜污染。当膜池内污泥质量浓度增至一定程度时，可将膜池内污泥排出，从而降低了膜池内有机物及无机盐的质量浓度，也能降低膜污染程度，从而保障膜通量。当 TMP 达到设定限值时，通过气水洗及化学清洗措施，可对膜进行恢复性清洗，从而进入下一个循环。

2.5 能量平衡分析

表 2 为膜预浓缩最佳条件下的能量平衡数据。膜浓缩及厌氧消化系统能耗输入端主要有水量

表 2 能量平衡分析  
Table 2 Energy balance analysis

| 项目   | 进水流量                            | 提升泵能耗                               | 平均TMP          | 抽吸能耗                                | 标准空气流量                             | 曝气能耗                                | 厌氧消化所需的能耗 (UASB)                    | 需要总能耗                               |
|------|---------------------------------|-------------------------------------|----------------|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 单位   | m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> | kW·h <sup>-1</sup> ·m <sup>-3</sup> | kPa            | kW·h <sup>-1</sup> ·m <sup>-3</sup> | Nm <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> | kW·h <sup>-1</sup> ·m <sup>-3</sup> | kW·h <sup>-1</sup> ·m <sup>-3</sup> | kW·h <sup>-1</sup> ·m <sup>-3</sup> |
| 数值   | 4                               | 0.03                                | 10             | 0.229 4                             | 0.15                               | 0.041 0                             | 0.004 2                             | 0.263 6                             |
| 参考文献 | 本研究                             | [3]                                 | 本研究            | 本研究                                 | 本研究                                | 本研究                                 | [21]                                | 本研究                                 |
| 项目   | 平均进水 COD                        | <sup>1)</sup> 浓缩液COD                | 初沉污泥厌氧可生化COD比例 | 甲烷化学能 (以每千克甲烷计)                     | 产甲烷系数                              | 甲烷产电效率                              | 通过甲烷回收能量                            | 回收能量占比                              |
| 单位   | mg·L <sup>-1</sup>              | mg·L <sup>-1</sup>                  |                | kW·h                                | g·g <sup>-1</sup>                  |                                     | kW·h <sup>-1</sup> ·m <sup>-3</sup> |                                     |
| 数值   | 135                             | 6 096                               | 70%            | 13.9                                | 0.23                               | 38%                                 | 0.087 6                             | 33%                                 |
| 参考文献 | 本研究                             | 折算原污水的 COD为103 mg·L <sup>-1</sup>   | 本研究            | [3]                                 | [3]                                | [3]                                 | 本研究                                 | 本研究                                 |

注：<sup>1)</sup>A实验基地阶段2，按强化混凝72 h浓缩液情况进行厌氧消化反应考虑。



提升、膜过滤抽吸、间歇曝气擦洗、厌氧消化等环节。而加药剂的能量需求没有考虑在内,这是由于其能耗占比几乎可忽略。在上述环节中,抽吸能耗最高,达 $0.2294\text{ kW}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ ,占到总能耗的87%。这可能是由于本装置选取的抽吸泵功率偏大而引起。按最优运行条件下,以在A实验基地的阶段2强化混凝72h浓缩液有机物进行厌氧消化反应考虑,浓缩液COD为 $6096\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均从污水中提取耗氧有机物(以COD计)的质量浓度为 $103\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。经计算,通过甲烷回收能量为 $0.0876\text{ kW}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ ,回收量占总能耗的33%,净能量产量为 $-0.176\text{ kW}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ ,还不能达到100%能源自给率。这主要由于进水COD较低导致浓缩液有机物回收量少,严重制约了有机物转化为能源的回收量。杨敏等<sup>[22]</sup>分析大型再生水厂A<sup>2</sup>/O-MBR各处理单元能耗,抽吸能耗仅约 $0.0505\text{ kW}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ 。若按此计算,预浓缩有机物产生能量占到总能耗的70%,处理单位配套设备适宜能显著提高能源自给率。当前,我国的市政污水厂进水COD偏低,。随着城镇管网不断完善,减少雨水、河水、地下水进入污水管网,预测未来污水厂进水COD将不断提高。这种预浓缩技术可将碳源与餐厨垃圾协同厌氧消化,其净能量产量能由负值转为正值,使得污水厂变为能源工厂<sup>[23-24]</sup>。

### 3 结论

1) 碳源捕获工艺浓缩时间以3~4d为宜,耗氧有机物(以COD计)回收率超过90%。能量平衡分析显示,甲烷回收能量为 $0.0876\text{ kW}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

2) 在过滤压差、透过水流、复合阻塞剂的作用下,膜丝表面易形成稳定的吸附性滤饼层。堆积在膜表面而形成的可逆性膜面污染,能显著降低膜污染程度,从而提高过水能力。尤其在阶段3,过滤抽吸周期内中膜比通量几乎恒定。

3) 原水中投加复合阻塞剂,作为凝聚核心参与混凝过程,逐渐形成更大的粒径和强度,絮体分支更多,透水性更好,较大的凝胶团被堆积在膜的表面。溶解性小分子有机物被复合阻塞剂的水解产物吸附,通过网捕和卷扫作用,黏附在凝胶团上。为保持较高膜通量情况下提高耗氧有机物(以COD计)的浓缩回收效率提供了理论支持。

4) 进水COD较低会导致浓缩液有机物回收量少,从而影响有机物转化为能源的回收量。预浓缩碳源再与餐厨垃圾协同厌氧消化,净能量产量由负值转为正值。原水碳源浓缩回收技术可为未来污水资源化利用及城市水务行业的碳减排提供参考。

### 参考文献

- [1] GONG H, JIN Z Y, WANG Q B, et al. Effects of adsorbent cake layer on membrane fouling during hybrid coagulation/adsorption microfiltration for sewage organic recovery[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 317: 751-757.
- [2] JIN Z Y, GONG H, WANG K J. Application of hybrid coagulation microfiltration with air backflushing to direct sewage concentration for organic matter recovery[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 283: 824-831.
- [3] 宫徽. 基于“碳源浓缩-氮源回收”的新型污水资源化工艺研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.
- [4] 金正宇. 强化膜混凝反应器(E-MCR)生活污水资源化处理工艺研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [5] 张亚雷. 污水处理低碳技术的现状与评价[J]. *质量与认证*. 2022(8): 78-80.
- [6] 王凯军. 可持续发展的新型、高效城市污水处理技术探讨[J]. *给水排水*, 2005, 31(2): 32-35.
- [7] 王凯军, 宫徽, 金正宇. 未来污水处理技术发展方向思考与探索[J]. *建设科技*, 2013(2): 36-38.
- [8] 戴晓虎, 张辰, 章林伟, 等. 碳中和背景下污泥处理处置与资源化发展方向思考[J]. *给水排水*, 2021, 47(3): 1-5.
- [9] 王凯军, 宫徽. 生态文明理念引领城市污水处理技术的创新发展[J]. *给水排水*, 2016, 42(5): 1-3.
- [10] 郝晓地, 程慧芹, 胡沅胜. 碳中和运行的国际先驱奥地利 Strass 污水厂案例剖析[J]. 2014, 30(22): 1-5
- [11] DIAMANTIS V, VERSTRAETE W, EFTAXIAS A, et al. Sewage pre-concentration for maximum recovery and reuse at decentralized level[J]. *Water Science and Technology*, 2013, 67: 1188-1193.
- [12] 李梅, 朱明璇, 王洪波, 等. 污泥对有机物的吸附动力学试验及模型构



- 建[J]. 安全与环境学报. 2019, 19(6): 2150-2158.
- [13] GONG H, JIN Z Y, WANG X, et al. Membrane fouling controlled by coagulation/adsorption during direct sewage membrane filtration (DSMF) for organic matter concentration[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, 32: 1-7.
- [14] MEZOHEGYI G, BILAD M R, VANKELECOM I F. Direct sewage up-concentration by submerged aerated and vibrated membranes[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 118: 1-7.
- [15] 杨媛. 两级动态膜反应器污水浓缩和厌氧发酵产能工艺特性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
- [16] 王凯军, 王晓惠, 柯建明, 等. 厌氧处理技术发展现状与未来发展领域[J]. 中国沼气, 1999, 17(4): 14-17.
- [17] 国家环境保护总局. 《水和废水监测分析方法》[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [18] 王启宾, 苑泉, 宫徽, 等. SBR系统在低浓度污水条件下培养的好氧颗粒污泥特性及微生物分析[J]. 环境工程学报, 2018, 12(11): 3043-3052.
- [19] 周岩, 李继, 吕小梅, 等. 吸附-预沉淀MBR工艺处理生活污水及膜污染控制效果[J]. 环境工程学报, 2013, 7(12): 4649-4652.
- [20] 姬晓羽. 混凝/粉末炭组合的水处理特性对膜污染控制的影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [21] JIN Z Y, MENG F L, GONG H, et al. Improved low-carbon-consuming fouling control in long-term membrane-based sewage pre-concentration: The role of enhanced coagulation process and air backflushing in sustainable sewage treatment[J]. *Journal of Membrane Science*, 2017, 529: 252-262.
- [22] 杨敏, 李亚明, 魏源送, 等. 大型再生水厂不同污水处理工艺的能耗比较与节能途径[J]. 环境科学, 2015, 36(6): 2203-2209.
- [23] 刘智晓. 未来污水处理能源自给新途径——碳源捕获及碳源改向[J]. 中国给水排水, 2017, 33(8): 43-52.
- [24] 石川, 李坤, 边潇, 等. 餐厨垃圾厌氧处理“碳中和”综合效益评价[J]. 中国环境科学, 2023, 43(1): 436-445.
- (责任编辑: 靳炜)

## Carbon source concentration and energy balance analysis of raw sewage based on membrane separation

WANG Qibin<sup>1</sup>, ZHANG Yilei<sup>2</sup>, CHANG Fengmin<sup>1</sup>, GAO Zhiyong<sup>2</sup>, WANG Kaijun<sup>1,\*</sup>

1. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. CSD water Service, Beijing 100192, China

**Abstract** It is an important way to collect and concentrate a large amount of organic matter contained in sewage and convert it into available energy such as methane. Using the physical and chemical separation of ultrafiltration membrane, the organic matter from raw sewage was directly collected and concentrated, and the best operating parameters and operation strategy were explored. The results showed that it was appropriate to retain organic matter for 3~4 days, and the COD recovery rate was over 90%. The energy balance analysis showed that  $0.0876 \text{ kW} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$  was recovered by converting organic matter into methane, accounting for 33% of the total energy consumption. Adsorption cake layer formed on the surface of the mesoporous fiber membrane prevented organic matter from binding closely with the membrane, which improved the efficiency of membrane separation. The mechanism of membrane pollution control was further analyzed to explore an optimal scheme to improve the concentration efficiency of oxygen consuming pollutant (COD). Capture carbon source from raw sewage can provide a good treatment method for energy self-sufficiency and resource utilization of sewage treatment in the future, and will have positive significance for carbon emission reduction in urban water industry.

**Keywords** municipal sewage; carbon source concentration; energy self-sufficiency; membrane contamination control