



编者按 在污水资源化及“双碳”目标驱动下，以污染物削减和水质净化为目的的传统好氧污水处理工艺正经受新技术进步和绿色发展的挑战。“以能耗换水质”的传统污水处理模式正在向集高效污染物削减与同步能源回收为一体的节能低碳新模式转变。据统计，我国污水处理行业的耗电量占全国总量的 2%~3%，而污水中含有大量有机物质，可通过厌氧甲烷发酵转化为能源，厌氧膜生物反应器（AnMBR）可进一步提高有机物的甲烷化率的同时保障处理水质，是一种产能的新型污水处理新工艺，也是污水处理厂实现能量自给的关键技术。

近年来，膜截留与厌氧生物处理耦联形成的 AnMBR 技术因具备产能、低碳、集约优势而备受关注。诸多研究者已将 AnMBR 用于处理低浓度城市污水以及高含固餐饮、养殖等污水，但仍未打通理论研究-技术研发-工程应用的关键环节。一方面，面向不同废水特性与处理需求的 AnMBR 高效能源回收与膜污染控制策略呈现差异化特征；另一方面，基于碳材料投加、电化学强化等措施的 AnMBR 效能提升机制与工艺优化仍处于探索阶段。目前，迫切需要系统评估 AnMBR 工艺的可行性、稳定性、适用性，为大规模工程化应用提供科学支撑。

为报道相关领域的前沿研究及应用成果，《环境工程学报》编辑部特邀日本东北大学李玉友教授、中国科学技术大学盛国平教授、西安建筑科技大学李倩教授为特邀学术编辑，组织“厌氧 MBR 污水资源化工艺与应用”专题，集中报道 AnMBR 的基础研究、工艺优化、应用案例、工程效能评价等方面取得的最新研究成果，以期推动 AnMBR 污水资源化方面的交流和探讨。

DOI 10.12030/j.cjee.202401032 中图分类号 X703 文献标识码 A

厌氧膜生物反应器研究与应用概述（代序言）

郭广泽¹, 李倩^{1,2,✉}, 李玉友¹

1. 日本东北大学土木与环境工程系，仙台 980-8579；2. 西安建筑科技大学，陕西省环境工程重点实验室，西安 710055

摘要 在污水资源化及双碳目标驱动下，开发节能、低碳、资源回收型处理技术是污水和废弃物处理领域的重要发展方向。将厌氧消化与膜分离结合的厌氧膜生物反应器（anaerobic membrane bioreactor, AnMBR）具有能耗低、可回收能源以及处理水质较好等优势，在过去 40 a 已经在工业废水、有机固体废弃物以及城市污水的资源化和能源化领域开展了广泛的研究。与传统厌氧消化技术相比，厌氧 MBR 通过膜分离过程延长了污泥停留时间，维持反应器中高生物量，促进了物质分解及甲烷转化，极大提高了厌氧消化的效率。为了推进厌氧 MBR 技术的工程化应用并提供技术与理论的支撑，《环境工程学报》编辑部邀请李玉友、盛国平、李倩 3 位教授组织了“厌氧 MBR 技术与有机废水资源化”专题，综述了厌氧 MBR 的发展历程、主要研究团队、在有机废水资源化中的应用及最新研究热点，作为该专题的代序言。

关键词 厌氧 MBR；厌氧消化；有机废水资源化

1 厌氧膜生物反应器的技术优势与发展历程

1.1 厌氧膜生物反应器的技术优势

厌氧膜生物反应器（anerobic membrane bioreactor, 厌氧 MBR）是一种耦合了厌氧消化和膜分离的新型生物处理技术，与传统厌氧生物处理比较具有能源回收率高、污泥产量小、出水 COD 低等优势。厌氧 MBR 启动周期短、适用范围广、处理负荷高、耐冲击能力强，在有机污水和废弃物的资源化处理方面也具有巨大的潜力。厌氧 MBR 的主要优点是可实现水力停留时间（hydraulic retention time, HRT）与污泥停留时间（solid retention time, SRT）的解耦控制，可使 SRT 达到传统厌氧消化法的数倍，为生长缓慢的产甲烷菌增殖和固形物分解提供了充足的时间，从而提升产甲烷效能，同时，可以缩短 HRT，大幅提升反应器的处理能

收稿日期：2024-01-08；录用日期：2024-02-29

基金项目：陕西省重点研发计划国际合作重点项目（2022KWZ-25）；日本学术振兴会海外特别研究员项目（P20794）

第一作者：郭广泽（1996—），男，博士，guangze.guo.d1@tohoku.ac.jp；✉通信作者：李倩（1987—），女，博士，教授，qian.li@xauat.edu.cn

力。通过提高 SRT 与 HRT 的比例,可以实现功能微生物富集、克服水解限制、改善污染物质去除且促进有机物的降解,从而提升系统的稳定性以及甲烷的生成效率。

1.2 厌氧 MBR 的发展历程

20 世纪 70 年代,传统生物处理工艺的最终处理水质主要依赖于沉淀池中的水动力条件和污泥的沉降特性,因此,沉淀池中实现充分固液分离需要消耗很长时间。1978 年 GRETHLEIN 首次在化粪池污水的厌氧处理后段添加了外部错流式膜组件,提高了生物量,BOD 去除率可达 85%~95%^[1]。20 世纪 80 年代,这种将膜组件引入厌氧消化过程以实现固液分离的生物处理工艺被定义为厌氧膜生物反应器^[2]。1982 年,Dorr-Oliver 公司开发了首个商用厌氧 MBR,用于处理高浓度乳清加工废水,被称为膜厌氧反应器(membrane anaerobic reactor system, MARS)。虽然对 MARS 工艺进行了中试规模测试,但由于膜成本较高并未对其进行大规模应用。1987 年,南非科学与工业研究理事会的 ROSS^[3]报道了厌氧消化与超滤结合的新型工艺厌氧消化超滤(anaerobic digestion ultra filtration, ADUF)且将其应用于酿酒产业废水的处理,从而有效解决了传统工艺中污泥浓缩与滞留的问题。从 1985 年开始,日本经济产业省启动了大型科研项目“水综合再生利用系统 90 年代计划”,推动了膜技术在废水处理领域的应用。20 世纪 90 年代末,日本久保田公司开发了浸没式厌氧 MBR 且将其应用到食品、饮料产业废水的处理过程中。2009 年,厌氧 MBR 处理城市污水时(COD 为 500 mg·L⁻¹),甲烷回收率可达 48%,而出水 COD 低于 40 mg·L⁻¹,展示出了其在低 COD 城市污水处理中的应用潜力^[4]。2009—2014 年,各国研究者对厌氧 MBR 应用进行了大量尝试,验证了厌氧 MBR 的经济可行性与环境可持续性,并创造性地开发出了厌氧动态膜生物反应器与厌氧电化学膜生物反应器等新设备装置。在 2015 年之后,厌氧 MBR 技术不断得到创新且其所在的应用范围也得到极大的拓展,在工业废水和有机固体废弃物的处理中展示出了传统技术不具有的独特优势。目前,围绕厌氧 MBR 效能提升、膜污染控制、膜材料优化、新工艺开发以及生命周期评价等方面开展了大量的研究,正逐步打通理论研究-技术研发-工程应用的关键环节^[5]。

2 厌氧 MBR 在工业废水、有机废弃物和城市污水处理中的应用

2.1 厌氧 MBR 应用于工业废水处理

厌氧 MBR 早期被应用于处理工业废水,日本久保田公司从 2000 年开始在世界范围内推广厌氧 MBR 的工程应用,包括在日本国内的酿酒、制糖、乳制品废水以及印度尼西亚的棕榈油废水处理过程中。近年来,厌氧 MBR 的应用范围拓展至制药废水、富含脂质废水及石化工业废水处理,相应的研究主要集中在废水中毒性物质对厌氧消化的影响、优化运行条件提升处理效果以及强化污染物质的降解与能源化。这些研究结果证明了其在高负荷或高盐度等极端条件下能够保持较好的稳定性能、高反应速率以及对长链脂肪酸等抑制物质的耐受能力,为工业废水的高速厌氧处理开辟了新的前景。

在应用厌氧 MBR 处理含有抗生素废水的研究中,厌氧 MBR 表现出了高效的有机物降解能力和较高的抗生素去除效率,并通过添加生物膜载体可以减缓膜污染以进一步促进抗生素的去除^[6]。在处理含富含脂质的乳制品废水时,与上流式厌氧污泥床(upflow anaerobic sludge blanket, UASB)反应器和其他高速厌氧废水处理工艺相比,厌氧 MBR 表现出更好的运行性能和更高的甲烷转化效率,在该报告中 SZABO-CORBACHO 等指出了厌氧 MBR 具有如下优势:1)防止悬浮污泥流失、保留混合液中的脂质以转化为甲烷;2)在高负荷条件下产甲烷稳定,挥发性脂肪酸不会积累;3)通过提高微生物浓度来克服长链脂肪酸的抑制作用^[7]。此外,同时使用 UASB 反应器和厌氧 MBR 处理 5 g·L⁻¹(以苯酚计)和 26 g·L⁻¹(以 Na⁺计)的高盐含酚废水时,UASB 因造粒过程受到影响以及污泥的反絮凝,导致处理能力严重下降,而厌氧 MBR 因为强化微生物含量和稳定的群落组成而表现出了出更好的稳定性^[8]。

2.2 厌氧 MBR 应用于有机废弃物处理

厌氧 MBR 已在有机固体废弃物如餐厨垃圾、城市污水厂混合污泥、剩余污泥及固废渗滤液的处理中得到应用且可稳定运行。与传统的连续搅拌式反应器相比,厌氧 MBR 表现出更高的 COD 去除率、系统稳定性和产甲烷活性。厌氧 MBR 处理餐厨垃圾的有机负荷通常为 2.4~10 kg·(m³·d)⁻¹(以 COD 计),两相厌氧 MBR 能够实现负荷高达 15 kg·(m³·d)⁻¹^[9]。日本 JFE 公司在长冈市的沼气发电中心应用 2 台 1 800 m³的厌氧 MBR 进行了餐厨垃圾的实证实验,处理量为 65 t·d⁻¹,发电量为 12 300 kWh·d⁻¹,与传统餐厨垃圾的甲烷

发酵相比, 甲烷产量提高了 22%, 污泥产量降低了 64%^[10]。

污泥的资源化处理是厌氧 MBR 的重要应用领域之一。与其他有机废弃物相比, 污泥普遍表现出较低的生物降解性, 并且由于其复杂的结构和难分解的细胞壁, 水解阶段是厌氧消化的限速步骤^[11]。目前厌氧 MBR 处理污泥的有机负荷为 $1.0\sim 16.0\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 甲烷转化率为 24%~64%, 产甲烷速率为 $0.1\sim 7.1\text{ L}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$ 。提高污泥中甲烷产量的策略包括以下 2 点: 将预处理过程与厌氧 MBR 相结合; 优化厌氧 MBR 的运行条件, 例如调整 SRT 或其他底物的共发酵。GUO 等^[12] 针对剩余污泥的厌氧消化, 开发了一种基于水力学空化的新型管式热处理方法并将其与厌氧 MBR 相结合, 该方法将甲烷产量提高了 23.5%~30.5%, 实现了 $5.70\sim 6.80\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ (以 volatile solids(VS) 计) 的净能量回收, 并具有处理温度低、处理时间短等优势。另一方面, 优化厌氧 MBR 的 SRT 可以在不产生高能源成本的情况下增强污泥的能量回收。CHEN 等通过提高 SRT 与 HRT 的比例实现了 *Chloroflexi* 等与污泥水解密切相关的微生物、甲基营养型和氢营养型产甲烷菌的富集, 提升了剩余污泥消化效率, 当 SRT 从 30 d 延长至 50 d 时, VS 去除率提高了 38.0%^[13]。

2.3 厌氧 MBR 应用于城市污水处理

厌氧 MBR 作为低碳型污水处理新技术, 相较于传统污水处理工艺具有运行成本低、可回收能源、处理效率高等优势。2017—2020 年, 李玉友教授团队在日本宫城县仙台市的仙盐污水处理中心开展了厌氧 MBR 处理实际城市污水的大型中试实验, 该装置配备自动化控制系统, 有效容积为 5 m^3 , 并设置了 12 枚 PVDF 制中空纤维膜, 总过滤面积为 72 m^2 。处理规模为 $20\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$, 进水悬浮固体 (suspended solids, SS) 为 $170\sim 250\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, COD 为 $300\sim 500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 总氮为 $36\sim 60\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 总磷为 $5\sim 8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 结果表明, 当厌氧 MBR 在 HRT 为 6 h 运行过程中, SS 去除率达到 100%, COD 去除率可达 91.1%, BOD_5 去除率为 95.1%, 甲烷产率达 $0.25\text{ L}\cdot\text{g}^{-1}$ (以 COD 计)^[14]。在此基础上, 将厌氧 MBR 与厌氧氨氧化成功偶联^[15], 使污水处理系统的能源消耗降至 $0.061\text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$, 温室效果气体排出量仅为 $0.142\text{ kg}\cdot(\text{m}^3)^{-1}$ (以 CO_2 计), 相比于好氧污水处理方法排放量大幅降低^[16]。CHEN 等^[17] 开发了颗粒活性炭协同的厌氧 MBR 处理城市污水, 在 $5\sim 35\text{ }^\circ\text{C}$ 内, 与传统厌氧 MBR 相比表现出更好的整体性能和更高的稳定性, 凸显了厌氧 MBR 在寒冷地区的应用潜力。

尽管各国研究者对厌氧 MBR 在城市污水的厌氧处理开展了广泛的研究, 厌氧 MBR 用于城市污水处理仍面临许多挑战, 如在低温条件下运行和溶解性甲烷问题。运行温度是影响污染物去除、甲烷回收和污泥特性的重要参数, 但低温条件下保持稳定运行和膜污染控制等问题仍制约厌氧 MBR 规模化的应用推广。此外, 厌氧 MBR 过滤水中溶解性甲烷问题也是将其商业化的限制因素。溶解性甲烷的逸出意味着大量生物能源的损失和能量回收效率的降低以及温室气体排放的增加。目前针对厌氧 MBR 处理水中溶解性甲烷的处理方法包括用气提法、膜接触器和真空脱气膜进行回收或利用生物氧化去除法^[5]。

3 厌氧 MBR 的主要研究团队及其代表性成果

应用 Web of Science 核心库以“anaerobic membrane bioreactor”为关键词于 2023 年 12 月进行检索, 结果表明, 在厌氧 MBR 领域发文量排名前 5 位的学者依次为日本东北大学李玉友教授、西班牙瓦伦西亚大学 SECO Aurora 教授、瓦伦西亚理工大学 FERRER José 教授、英国帝国理工学院 STUCKEY David 教授以及荷兰代尔夫特理工大学 LIER Jules van 教授, 这些团队的主要研究方向如表 1 所示。李玉友教授团队早期用厌氧 MBR 研究生物制氢^[18], 2010 年开始进行高浓度厌氧 MBR 处理食品产业废水的研究。同时, 开始用低污泥浓度的厌氧 MBR 处理城市污水的一系列基础研究。2017 年在污水处理厂搭建实验装置进行实际污水处理并于 2019 年建成世界最大级中试规模 AnMBR-PN/Anammox 系统^[19], 对城市污水的甲烷发酵性能、温度变化影响、处理水质、能源回收及温室气体排放进行了深入的研究。此外, 李玉友教授团队从 2016 年开始应用厌氧 MBR 对餐厨垃圾、城市污水厂污泥等有机废弃物进行高效厌氧消化等方面开展研究, 并通过引入前处理过程、优化运行条件等方式提升甲烷产量与处理效率, 考察了有机固体废弃物的产甲烷性能, 解决了污泥发酵中难分解, 甲烷转化率低, 以及高污泥浓度条件下膜污染等问题^[20-21]。2019 年协助日本 JFE 公司在长冈市进行了餐厨垃圾处理的应用实证^[10]。FERRER José 教授与 SECO Aurora 教授主要从事厌氧 MBR 在城市污水中的应用。团队于 2011 年建成了 2.9 m^3 中试规模的厌氧 MBR, 并于 2020 年建立了 40 m^3 处理城市污水的厌氧 MBR 示范工程^[22], 研究结果证实了该系统在处理污水过程中可以实现净能源产出并且温室

表 1 厌氧 MBR 的主要研究团队及其代表性成果
Table 1 Key research teams in AnMBR and their representative results

厌氧MBR主要学者	归属机构	发文数量	代表性成果
李玉友 (Yu-You Li)	日本东北大学	115	1.利用厌氧MBR进行生物制氢 ^[18] 2.低浓度厌氧MBR处理城市污水 ^[19] 3.高浓度厌氧MBR处理有机废弃物 ^[20-21]
Aurora SECO	瓦伦西亚大学	61	1.建立中试规模厌氧MBR处理城市污水 ^[22]
José FERRER	瓦伦西亚理工大学	59	2.厌氧MBR生命周期评价, 能源与环境影响以及经济与环境的可持续性 ^[23]
David STUCKEY	帝国理工学院	53	1.开发浸没式厌氧MBR处理城市污水 ^[24] 2.厌氧消化过程中SMP对膜污染的影响以及通过添加活性炭控制膜污染并提高运行通量 ^[25]
Jules van LIER	代尔夫特理工大学	53	1.连续临界通量测定控制泥饼层堆积 ^[26] 2.石化工业废水的高速厌氧消化及化合物降解(高盐含酚工业废水、沥青烟冷凝物等) ^[27-28]

气体排放量接近于零,提高了技术就绪水平,证明了厌氧 MBR 在气候温暖地区的污水厂进行全面应用的可行性。此外,该团队将厌氧 MBR 与好氧污水处理技术相对比,分析了的环境影响、经济与环境的可持续性^[23]。STUCKEY 教授^[24]较早地研究了浸没式厌氧 MBR 处理城市污水、含盐工业废水与固废渗滤液,并指出了胞外聚合物 (extracellular polymeric substances EPS) 与大分子蛋白质、多糖是导致膜污染的主要因素,研究了厌氧过程中可溶性微生物产物 (soluble microbial products, SMP) 的产生、积累以及转化等机制,并通过添加活性炭或者絮凝剂等去除 SMP 和胶体,从而减轻膜污染^[25]。STUCKEY 教授的研究深入地了解活性炭添加在膜通量改进中的确切作用,并优化其浓度,使得在厌氧 MBR 中产生最大的可持续通量。LIER 教授于 2006 年首次提出了通过测定临界通量的方法来控制泥饼层堆积,并对泥饼层的形成机理进行了详细的研究^[26]。目前关于工业废水的高速厌氧处理主要包括石化工业废水^[27]、沥青烟冷凝物^[28]、乳制品废水^[7],特别是对厌氧 MBR 处理高盐含酚类废水进行了深入研究^[8],考察了反应器运行温度、SRT、有机负荷对苯酚转化率的影响,并通过苯酚降解菌的原位强化或额外添加碳源等方式增强含酚类废水的处理效果。

此外,韩国仁荷大学金正桓教授团队、悉尼科技大学 NGO Huu Hao 教授团队、清华大学黄霞教授团队和新加坡南洋理工大学刘雨教授团队也是厌氧 MBR 的主要研究团队。中国作为厌氧 MBR 全球发文量最多的国家,也是厌氧 MBR 技术的重要研究地区,同济大学是世界上仅次于日本东北大学发文量的科研机构。根据 Web of Science 的论文检索统计结果,发文量前 4 位的中国学者依次为清华大学黄霞教授 (38 篇)、同济大学王志伟教授 (35 篇)、西安建筑科技大学陈荣教授 (34 篇)、西安建筑科技大学胡以松副教授 (29 篇)。

4 基于厌氧 MBR 的研究热点与新技术开发

厌氧 MBR 可以同步实现有机物的有效去除和能源回收,但此技术仍存在以下挑战: 1) 在对低生物降解性物质的厌氧消化过程中,有机物分解不充分导致甲烷回收量低,对实现能量中和或净回收不利; 2) 相比较于处理城市污水,在处理高 COD 废水或有机固体废弃物过程中通常会导致更严重的膜污染,在高污泥浓度条件下实现稳定的膜运行和高运行通量非常困难; 3) 厌氧 MBR 无法对氮和磷等无机污染物实现有效去除,导致膜出水中含有高浓度的营养元素,无法满足严格的排放或回用标准。为应对这些挑战,厌氧 MBR 未来的研究方向主要集中在以下 3 个方面。

4.1 多元耦合作用强化厌氧 MBR 产甲烷性能

对于厌氧 MBR 能源回收不足的问题,需要进一步加强甲烷转化,充分发挥能源回收的潜力。但只依靠运行条件的优化来促进物质分解和能源回收的效果十分有限,在厌氧 MBR 技术中引入前处理或将厌氧 MBR 与其他装置结合、添加新型材料成为了新的研究趋势。SUN 等^[19]将乙醇发酵作为厌氧 MBR 处理餐厨垃圾前的预处理,克服了在高负荷条件下的丙酸积累,达成了目前厌氧 MBR 处理餐厨垃圾的最高运行负荷 43.5 kg·(m³·d)⁻¹。在有机污泥的厌氧消化过程中,有研究通过厌氧 MBR 与超声预处理或水热预处理相结合的方式,解决了水解限速的问题,实现了高效的能源回收^[12]。此外,将厌氧 MBR 与电化学过程相结合或在

其中添加活性炭、生物炭等炭基材料来激发基于种间电子转移的互营代谢过程, 进而强化有机物的降解, 提高转化甲烷的效率^[29-30]。

4.2 新型膜污染控制方法

目前应对厌氧 MBR 膜污染问题, 主要采用物理清洗与化学清洗相结合的方式去除可逆与不可逆性污染。近年来, 采用膜运行方式优化实现最大可持续通量以及原位化学清洗成为了经济、高效的膜污染抑制手段^[31-32]。此外, 新型厌氧 MBR 的设计, 如利用在支撑材料上形成的附加层来截留过滤溶液中悬浮颗粒的厌氧动态膜生物反应器 (AnDMBR)^[33], 利用导电材料改性膜或直接采用导电膜的厌氧电化学膜生物反应器 (AnEMBR)^[29], 比气体喷射冲刷更节能的厌氧振动膜生物反应器 (AnVMBR)^[34], 可以实现高水通量和高营养物截留率的厌氧渗透膜反应器 (AnOMBR)^[35] 等可以更好地解决膜组件成本高、膜通量低和污染速度快等问题。应用机器学习和自动控制解决膜污染和清洗也需要进一步的研究^[36]。

4.3 与厌氧氨氧化工艺耦合实现对膜出水的同时氮去除与磷回收

针对膜分离过程无法对氮、磷等营养物质进行有效去除, 需要一个经济、可持续的后处理系统与之结合以提升膜出水的整体水质^[37]。李玉友研究团队提出并通过中试实验验证了厌氧 MBR 和厌氧氨氧化耦合系统, 在城市污水处理中取得了良好的效果^[15-16], 并开发了利用基于羟基磷灰石的厌氧氨氧化 (HAP-PN/Anammox) 工艺作为厌氧 MBR 膜出水的后处理技术, 可以实现氮去除与磷回收的同步完成^[38-39]。目前正在进行的使用 HAP-PN/Anammox 处理浓缩有机污泥的厌氧消化膜出水, 可实现 81.6% 的总氮去除率, 针对膜出水的高磷浓度 ($91.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 通过添加 Ca^{2+} 提高反应器中的 Ca 与 P 的比例可促进 HAP 形成, 从而实现了磷的高回收率^[40]。李玉友教授团队提出的厌氧 MBR 与 HAP-PN/Anammox 相结合的复合系统可以同时实现对浓缩污泥的高效厌氧消化、氮去除与磷的回收, 该系统在污水、废弃的资源化处理方面具有广阔的应用前景。

5 展望

自厌氧 MBR 技术首次提出以来经过 40 余年的研究, 因其具有的突出优势, 已在工业废水和有机固体废弃物处理领域中得到成功应用。在城市污水处理中从基础研究到中试规模实验进行了不懈努力, 并且研究成果不断增加, 特别是有关膜运行和膜污染控制的理论与经验正在不断积累。根据应用领域的不同, 需要在膜组件的开发与设计、膜污染控制和操作自动化方面进行新的创新, 开发适用于低浓度和高浓度废水的稳定高效运行系统。未来以厌氧 MBR 为核心开发与其他技术相结合的复合处理系统实现污水能源-资源的全量回收, 是引领节能、低碳型水处理的革新技术。

参考文献

- [1] GRETHLEIN H E. Anaerobic digestion and membrane separation of domestic wastewater[J]. Journal (Water Pollution Control Federation), 1978: 754-763.
- [2] JAIN M. Anaerobic membrane bioreactor as highly efficient and reliable technology for wastewater treatment: A review[J]. Advances in Chemical Engineering and Science, 2018, 8(2): 82.
- [3] ROSSI WR, BARNARD JP, IE Roux, J, et al. Application of ultrafiltration membranes for solids liquid separation in anaerobic digestion systems: The ADUF process[J]. Water Sa, 1990, 16(2): 85-91.
- [4] HO J, SUNG S. Anaerobic membrane bioreactor treatment of synthetic municipal wastewater at ambient temperature[J]. Water Environment Research, 2009, 81(9): 922-928.
- [5] HU Y, CAI X, XUE Y, et al. Recent developments of anaerobic membrane bioreactors for municipal wastewater treatment and bioenergy recovery: Focusing on novel configurations and energy balance analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 356: 131856.
- [6] CHENG D, NGO H H, GUO W, et al. Anaerobic membrane bioreactors for antibiotic wastewater treatment: performance and membrane fouling issues[J]. Bioresource Technology, 2018, 267: 714-724.
- [7] SZABO-CORBACHO M A, PACHECO-RUIZ S, MIGUEZ D, et al. Impact of solids retention time on the biological performance of an AnMBR treating lipid-rich synthetic dairy wastewater[J]. Environmental Technology, 2021, 42(4): 597-608.
- [8] SIERRA J D M, OOSTERKAMP M J, WANG W, et al. Comparative performance of upflow anaerobic sludge blanket reactor and anaerobic membrane bioreactor treating phenolic wastewater: Overcoming high salinity[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 366: 480-490.
- [9] AMHA Y M, CORBETT M, SMITH A L. Two-phase improves performance of anaerobic membrane bioreactor treatment of food waste at high organic loading rates[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(16): 9572-9583.
- [10] TOMIDA Yohei, RIKIHISA Shinsuke, MAKITA Akihiro. Methane Fermentation System with Membrane Bioreactor[J]. JFE Technical Report, 2022(50): 14-19.

- [11] GUO G, ZHOU S, CHEN Y, et al. Enhanced methanogenic degradation and membrane fouling associated with protein-EPS by extending sludge retention time in a high-solid anaerobic membrane bioreactor treating concentrated organic sludge[J]. *Water Research*, 2024, 248: 120879.
- [12] GUO G, LI Y, ZHOU S, et al. Enhanced degradation and biogas production of waste activated sludge by a high-solid anaerobic membrane bioreactor together with in pipe thermal pretreatment process[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 346: 126583.
- [13] CHEN G, WU W, XU J, et al. An anaerobic dynamic membrane bioreactor for enhancing sludge digestion: Impact of solids retention time on digestion efficacy[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 329: 124864.
- [14] KONG Z, WU J, RONG C, et al. Large pilot-scale submerged anaerobic membrane bioreactor for the treatment of municipal wastewater and biogas production at 25 °C[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 319: 124123.
- [15] RONG C, LUO Z, WANG T, et al. Biomass retention and microbial segregation to offset the impacts of seasonal temperatures for a pilot-scale integrated fixed-film activated sludge partial nitrification-anammox (IFAS-PN/A) treating anaerobically pretreated municipal wastewater[J]. *Water Research*, 2022, 225: 119194.
- [16] RONG C, WANG T, LUO Z, et al. Achieving low-carbon municipal wastewater treatment by anaerobic membrane bioreactor at seasonal temperatures: A pilot scale investigation on reducing sludge yield and greenhouse gas emissions[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 463: 142415.
- [17] CHEN C, SUN M, LIU Z, et al. Robustness of granular activated carbon-synergized anaerobic membrane bioreactor for pilot-scale application over a wide seasonal temperature change[J]. *Water Research*, 2021, 189: 116552.
- [18] LEE D Y, LI Y Y, NOIKE T, et al. Behavior of extracellular polymers and bio-fouling during hydrogen fermentation with a membrane bioreactor[J]. *Journal of Membrane Science*, 2008, 322(1): 13-18.
- [19] WU J, KONG Z, LUO Z, et al. A successful start-up of an anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) coupled mainstream partial nitrification-anammox (PN/A) system: A pilot-scale study on in-situ NOB elimination, AnAOB growth kinetics, and mainstream treatment performance[J]. *Water Research*, 2021, 207: 117783.
- [20] CHENG H, LI Y, GUO G, et al. Advanced methanogenic performance and fouling mechanism investigation of a high-solid anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) for the co-digestion of food waste and sewage sludge[J]. *Water Research*, 2020, 187: 116436.
- [21] GUO G, ZHOU S, CHEN Y, et al. Evaluation of bioenergy production and material flow in treating Japanese concentrated Johkasou sludge using high-solid anaerobic membrane bioreactor based on one-year operation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 469: 143918.
- [22] ROBLES Á, DURAN F, GIMENEZ J B, et al. Anaerobic membrane bioreactors (AnMBR) treating urban wastewater in mild climates[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 314: 123763.
- [23] JIMENEZ-BENITEZ A, FERRER F J, GRESES S, et al. AnMBR, reclaimed water and fertigation: Two case studies in Italy and Spain to assess economic and technological feasibility and CO₂ emissions within the EU Innovation Deal initiative[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 270: 122398.
- [24] HU A Y, STUCKEY D C. Treatment of dilute wastewaters using a novel submerged anaerobic membrane bioreactor[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2006, 132(2): 190-198.
- [25] AKRAM A, STUCKEY D C. Flux and performance improvement in a submerged anaerobic membrane bioreactor (SAMBR) using powdered activated carbon (PAC)[J]. *Process Biochemistry*, 2008, 43(1): 93-102.
- [26] JEISON D, VAN LIER J B. On-line cake-layer management by trans-membrane pressure steady state assessment in anaerobic membrane bioreactors for wastewater treatment[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2006, 29(3): 204-209.
- [27] REA V S G, SIERRA J D M, EL-KALLINY A S, et al. Syntrophic acetate oxidation having a key role in thermophilic phenol conversion in anaerobic membrane bioreactor under saline conditions[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 455: 140305. [27] REA V S G, BUENO B E, SIERRA J D M, et al. Chemical characterization and anaerobic treatment of bitumen fume condensate using a membrane bioreactor[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 447: 130709.
- [28] SUN J, KOSAKI Y, KAWAMURA K, et al. Operational load enhancement for an anaerobic membrane bioreactor through ethanol fermentation pretreatment of food waste[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 249: 114840.
- [29] ZHEN G, PAN Y, HAN Y, et al. Enhanced co-digestion of sewage sludge and food waste using novel electrochemical anaerobic membrane bioreactor (EC-AnMBR)[J]. *Bioresource Technology*, 2023, 377: 128939.
- [30] WANG G, LI Y, SHENG L, et al. A review on facilitating bio-wastes degradation and energy recovery efficiencies in anaerobic digestion systems with biochar amendment[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 314: 123777.
- [31] CHENG H, LI Y, KATO H, et al. Enhancement of sustainable flux by optimizing filtration mode of a high-solid anaerobic membrane bioreactor during long-term continuous treatment of food waste[J]. *Water Research*, 2020, 168: 115195.
- [32] MEI X, QUEK P J, WANG Z, et al. Alkali-assisted membrane cleaning for fouling control of anaerobic ceramic membrane bioreactor[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 240: 25-32.
- [33] XING B S, ZHANG Y, ZHANG R Q, et al. An anaerobic dynamic membrane bioreactor (AnDMBR) system enhanced the biogas conversion efficiency and stability of mesophilic codigestion with waste activated sludge and food waste[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 471: 144432.
- [34] YANG Y, GUO W, NGO H H, et al. Bioflocclulants in anaerobic membrane bioreactors: A review on membrane fouling mitigation strategies[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 486: 150260.
- [35] AN Z, ZHU J, ZHANG M, et al. Anaerobic membrane bioreactor for the treatment of high-strength waste/wastewater: A critical review and update[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 470: 144322.
- [36] WANG T, LI Y Y. Predictive modeling based on artificial neural networks for membrane fouling in a large pilot-scale anaerobic membrane bioreactor for treating real municipal wastewater[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 912: 169164.
- [37] HE M, NG T C A, HUANG S, et al. Ammonium removal and recovery from effluent of AnMBR treating real domestic wastewater using polymeric hydrogel[J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 296: 121376.
- [38] CHEN Y, FENG G, GUO G, et al. Nitrogen removal by a Hydroxyapatite-enhanced Micro-granule type One-stage partial Nitrification/anammox process following anaerobic membrane bioreactor treating municipal wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 348: 126740.

- [39] GUO Y, SANJAYA E H, RONG C, et al. Treating the filtrate of mainstream anaerobic membrane bioreactor with the pilot-scale sludge-type one-stage partial nitrification/anammox process operated from 25 to 15° C[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 351: 127062.
- [40] GUO G, ZHOU S, CHEN Y, et al. Phosphorus recovery coupling with one-stage partial nitrification/anammox process for the treatment of high-nutrient permeate from anaerobic membrane bioreactor treating concentrated organic sludge[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 484: 149474.

(责任编辑: 曲娜)

A review of recent advancements in the research and application of anaerobic membrane bioreactors

GUO Guangze¹, LI Qian^{1,2,*}, LI Yuyou¹

1. Tohoku University, Department of Civil and Environmental Engineering, Sendai 980-8579, Japan; 2. Xi'an University of Architecture and Technology, Key Lab of Environmental Engineering, Xi'an 710055, China

*Corresponding author, E-mail: qian.li@xauat.edu.cn

Abstract In response to the imperative of wastewater resource utilization and the 'carbon peaking and carbon neutrality strategy,' the development of energy-saving, low-carbon, and resource-recovery treatment technologies emerges as a crucial focus in the wastewater and waste treatment. Over the past 40 years, the anaerobic membrane bioreactor (AnMBR), which integrates anaerobic digestion with membrane separation, has garnered significant attentions. This technology boasts advantages such as low energy consumption, energy recovery, and excellent permeate quality, leading to widespread research across various sectors including industrial wastewater, organic solid waste, and municipal wastewater resource and energy utilization. Compared to conventional anaerobic bioreactors, AnMBR significantly enhances digestion efficiency by extending sludge retention time through membrane separation, thereby maintaining high biomass levels in the reactor and facilitating substance degradation and methane conversion. In a bid to advance the engineering application of AnMBR technology and offer technical and theoretical support, the Chinese Journal of Environmental Engineering has commissioned three professors—Li Yuyou, Sheng Guoping, and Li Qian—to organize a special subject on 'AnMBR Technology and Organic Wastewater Resource Utilization.' This paper serves as a preface to the topic, summarizing the development history of AnMBR, highlighting key research teams, outlining its applications in organic wastewater resource utilization, and presenting the latest research hotspots.

Keywords anaerobic membrane bioreactor; anaerobic digestion; organic wastewater resource utilization