

MABR 技术及其在污水处理厂提标改造中的应用

石 岩¹, 许丹宇², 唐运平², 段云霞²

(1. 天津市农业科学院, 天津 300381; 2. 天津市生态环境科学研究院, 天津 300191)

[摘要] 膜曝气生物膜反应器(MABR)是一项利用氧气选择性透过膜提供氧气并作为生物膜载体的新型生物膜污水处理技术,该技术能够有效降低污水处理能耗,提高污水处理设施负荷,强化 N、P 营养物的去除,在处理高需氧量废水、挥发性有机污染物废水、高氨氮废水方面具有显著的技术优势。介绍了 MABR 的工艺原理、技术优势、应用领域及其在污水处理厂提标改造中的应用案例,并对该技术未来的发展方向进行了展望。

[关键词] 膜曝气生物膜反应器;无泡供氧;同步硝化反硝化;提标改造;节能降耗

[中图分类号] X703 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2021)10-0022-06

Membrane-aerated biofilm reactor and its application in upgrading of sewage treatment plant

SHI Yan¹, XU Danyu², TANG Yunping², DUAN Yunxia²

(1. Tianjin Academy of Agricultural Sciences, Tianjin 300381, China;

2. Tianjin Academy of Eco-environmental Science, Tianjin 300191, China)

Abstract: MABR is a new biofilm sewage treatment technology which uses oxygen selective transmission membrane to provide oxygen and serves as a biofilm carrier. This technology can effectively reduce the energy consumption of sewage treatment, improve the load of sewage treatment facilities and strengthen the removal of N and P nutrients. It has significant technical advantages in the treatment of high oxygen demand wastewater, volatile organic pollutants wastewater and high ammonia nitrogen wastewater. The process principle, technical advantages, application fields, and application cases in the upgrading and reconstruction of sewage treatment plant of MABR were introduced, and the future development direction was proposed.

Key words: MABR; bubbleless aeration; simultaneous nitrification and denitrification; upgrading and reconstruction; energy conservation

膜曝气生物膜反应器(membrane-aerated biofilm reactor, MABR)是一种将膜技术与生物反应器技术相结合的新型污水处理技术,其利用氧气选择性透过膜进行无气泡供氧,氧气利用率极高,可显著降低污水处理能耗^[1],同时其负载的生物膜可大大增加系统内的生物总量,从而提高污水处理负荷^[2]。另外, MABR 生物膜为硝化细菌优势生长生物膜,可在同一生化池内实现同步硝化与反硝化,进而能够强化氮(N)、磷(P)营养物的去除^[3]。MABR 可直接安装

在现有反应池内,安装简单,可实现不停产安装,适用于各种池型,其在处理高需氧量废水^[4-5]、挥发性有机污染物废水^[6]、高氨氮废水^[7-8]方面具有显著的技术优势。随着城市的发展,人口的增加,以及污水排放标准的不断提升,我国众多污水厂目前面临负荷增加,出水无法达标,以及可用占地受限等多方面的挑战。而 MABR 技术为这些污水厂面临的挑战提供了一项可靠的解决方案。另外,从可持续发展的角度来看, MABR 技术节能降耗,是污水厂实现能量自

[基金项目] 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07107-001-004)

平衡的关键技术之一。

笔者重点介绍了 MABR 的工艺原理、技术优势、应用领域及其在国外污水处理厂提标改造中的应用案例, 以期为我国污水处理厂提标改造提供新的技术途径和参考。

1 MABR 工艺原理

图 1 所示为固定生物膜-活性污泥(integrated fixed-film activated sludge, IFAS)与 MABR 生物膜传质对比。

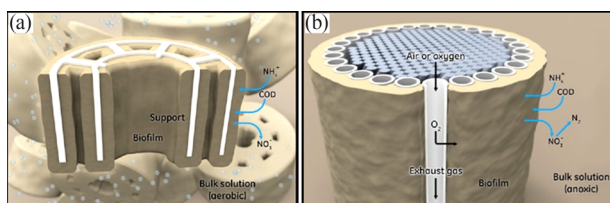


图 1 IFAS 生物膜(a)与 MABR 生物膜(b)传质对比^[9]

Fig. 1 Comparison between co-diffusional IFAS biofilm(a) and counter-diffusional MABR biofilm(b)^[9]

在 IFAS 生物膜系统中, 氧气的传质方向和氨氮、有机物的传质方向是相同的, 表层生物膜上能够生长硝化菌, 但当 COD 较高时, 异养菌增殖迅速, 会限制自养型硝化菌的生长, 影响硝化反应的进行。此外, 厌氧条件出现在非渗透性支撑物/生物膜界面附近, 能够生长反硝化菌, 但由于缺乏电子供体(有机底物), 反硝化反应进行较慢或很难进行。

而在 MABR 生物膜系统中, 氧气的传质方向和氨氮、有机物的传质方向是对向流, 由于氨氮分子小, 其扩散速率远远大于有机污染物, 可有效避免自养型硝化菌和异养菌在氧气上的竞争^[10], 因而在靠近膜表面形成硝化菌优势生长, 可最大程度地提高系统的硝化反应速率及硝化反应的稳定性; 同时, 反硝化可在远离膜表面的生物膜厌氧区或缺氧区以及悬浮的混合液内进行, 实现同步硝化与反硝化。此外, MABR 技术通过尾气的大气泡脉冲擦洗膜表面, 使得生物膜厚度的控制简单可行。因此, MABR 是一项更适合同步硝化反硝化反应的全新生物膜技术。

MABR 膜组件结构及安装示意如图 2 所示。纱线膜芯支撑多根透气细丝, 既柔韧又不会断裂, 多根膜丝封装在顶部和底部集管中构成膜组件, 膜组件安装在钢架中形成膜箱, 膜箱被放置在生物反应器的混合液中, 低压空气被输送到膜箱以传递氧并起

到混合废水的作用。

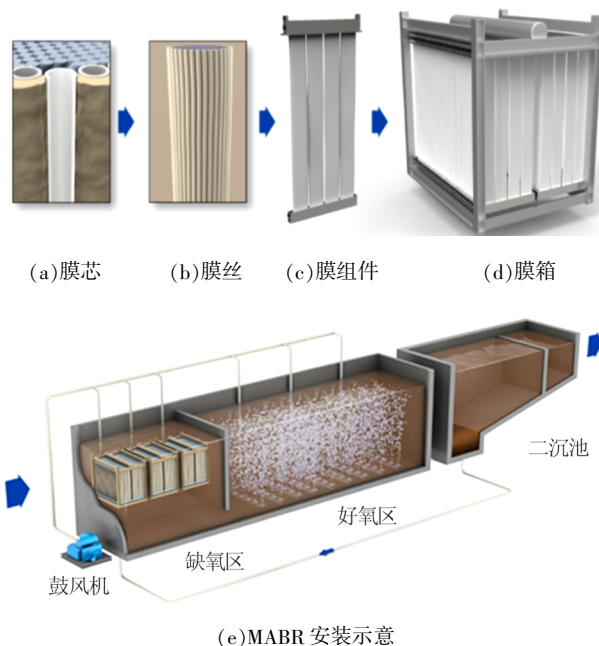


图 2 MABR 膜组件结构及安装示意

Fig. 2 Module structure and installation diagram of MABR

2 MABR 技术特点及优势

2.1 提标扩容

MABR 反应器可直接安装在现有反应池内, 利用氧气选择性透过膜进行无气泡供氧, 供氧效率高; 所供氧气可被其所载生物膜充分利用, 不仅氧气利用率高, 而且大大增加了系统的生物总量, 从而可实现污水处理厂扩容而不扩建的目的。采用 MABR 进行升级改造, 可根据需求提高现有污水处理厂负荷的 20%~40%, 甚至更高。

MABR 氧气的传质方向和氨氮、有机物的传质方向是对向流, 硝化菌在靠近膜表面形成优势生长并得到外层生物膜保护, 既提高了系统的硝化反应速率, 又确保了硝化反应的稳定性, 其优势在负荷冲击及冬季水温较低的情况下尤其明显。有现场中试表明, 采用 MABR 体系处理城市污水, 硝化反应速率基本不受冬季低温的影响^[10]。将 MABR 反应器安装在厌氧或兼氧池内, 可实现同步硝化与反硝化, 在出水总氮相同的条件下, 与其他除氮工艺如 A²O 相比, 可减少内回流比, 既可提高反硝化效果, 又可以节约碳源及能耗。

2.2 节能降耗

在传统活性污泥工艺中, 40%~60% 的能耗用于

曝气,但是鼓风曝气只能将5%~25%的氧转移到水中,剩余的会以气泡的形式逸出进入大气,供氧(O_2)效率一般为 $1.5\text{ kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。MABR膜一般采用致密膜,氧气通过分子扩散透过膜壁进入生物膜,通常在生物膜内全部被利用,几乎不产生气泡,因此称为无泡供氧。由于曝气过程不产生气泡,氧气几乎百分之百地被吸收,传质效率可高达100%^[11],供氧(O_2)效率可达 $6\text{ kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 以上^[12]。另外,氧在传递到生物膜的过程中不经过液相边界层,传质阻力比常规曝气法小得多,氧气的传输速率大大提高。同时,通过控制膜内氧气压力,可以对氧气的供应量进行调节,在保证生物膜生长需氧的同时,可避免因过量曝气而使污水中DO浓度过高,这样既可以保证反硝化效果,又可以降低运行费用。此外,MABR还能充分利用进水中的有机物,协同短程硝化反硝化,从而节省额外的碳源投加^[13],这对于我国普遍存在的低C/N的污水而言,将可节省巨额运行费用。简而言之,MABR可直接安装在现有反应池内,无需气泡曝气,比传统活性污泥工艺(CAS)可节省能耗30%,比IFAS可节省能耗50%。

2.3 安装操作简便

MABR设备紧凑、所占空间小,可直接安装在现有反应池内,适用于各种池型,能实现自动化控制和远程控制,方便污水处理厂的改建扩建,可将现有污水处理厂负荷提高20%~40%。MABR曝气设施维护简单,生物反应过程不易产生泡沫,生物膜厚度可控、易于调节以实现不同处理要求。

除此以外,MABR膜系统还具有同步硝化反硝化、抗水质冲击负荷能力强、生物膜泥龄长活性高、污泥产量少、基建运行成本低等诸多优点^[14]。

3 技术应用领域

3.1 用于高氨氮废水的处理

MABR独有的异向传质生物膜结构使得底物和氧的浓度梯度方向正好和传统的生物膜法相反,其每层区域都能够培育出各自独特的适于本层特征的微生物种群^[15],通过优化氧分压、有机负荷等操作条件,可具有同时去除有机污染物和同步硝化反硝化脱氮的处理功能,有效克服了传统生物膜法存在的载体性能较差、滤料易堵塞、生物膜易脱落等问题^[16],适宜于厌氧消化上清液、垃圾渗滤液、养殖废水、高

氨氮工业废水等的处理。A. TERADA等^[17]采用终端式MABR反应器对含高氨氮的养殖废水进行处理,结果表明,MABR能够有效处理该废水,当进水总有机碳(TOC)和总氮(TN)的表面负荷分别为 5.76 、 $4.48\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 时,TOC和TN的平均去除率可分别达到96%和83%。李意等^[18]采用MABR技术对低碳氮比的二级生化出水进行深度脱氮,其采用增强型聚偏氟乙烯(PVDF)中空纤维帘式膜作为MABR的膜组件。结果表明,当控制曝气压力为 0.01 MPa ,跨膜曝气流速为 $0.005\text{ cm}/\text{min}$,HRT为8h时,出水TN能够稳定达到《水污染物综合排放标准》(DB 11/307—2013)的要求。

3.2 用于农村生活污水处理一体化装置

传统的分散式农村污水处理工艺存在工程占地面积大、工艺流程长、泥水分离效率及生化反应速率低的缺点,且处理系统相对复杂,对后期运维存在较大挑战。MABR因其高效的氧利用效率和内外分层的特殊生物膜结构,便于实现集装箱化和模块化的农村生活污水处理一体化装置。陈文华等^[19]进行了浙江省首例MABR农村污水治理项目(项目编号TD-KJ-17-010)的研究,主要研究了MABR装置对生活污水中COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN和SS的去除性能及规律。结果表明,MABR系统运行稳定,处理出水水质可达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准,MABR系统具有一定的抗高氨氮冲击性。天津大学研制出一台小型MABR实验装置用于处理生活污水,其采用循环挂膜法进行聚丙烯中空纤维表面生物膜的培养。运行结果表明,该装置对污水中的COD和SS具有较好的去除效果,在适宜的条件下,当HRT为10h时,出水COD可保持在 $50\text{ mg}/\text{L}$ 以下,SS可保持在 $15\text{ mg}/\text{L}$ 以下^[20]。

3.3 用于城市河道水体生物修复

近年来,我国加大了对城市河道污染的治理力度。MABR技术的特点决定了其在城市河道水体生物修复方面具有独特的优势,包括氧气传质速率高、生物膜载体比表面积大、可直接在河道水体中布设、运行费用低等。李保安等^[21]以天津市华苑受污染河道水为研究对象,设计了新型连续式MABR反应器,进行了河道水长期净化实验。结果表明,MABR对河道水中的COD和氨氮具有十分显著的去

果,对 COD、氨氮和总氮的去除效能分别达到 1.9、0.35、0.28 g/(m²·d)。李浩等^[22]为地表水劣 V 类水质的天津高新区海泰南北大街景观河设计研发了水草式 MABR 膜组件及其水体修复系统,连续 5 个月的水质监测与观察结果表明,MABR 生物修复系统有效地提高了景观河水体的自净能力,经处理河道水体的氨氮、总磷、COD 均达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类或Ⅳ类标准,总氮达到 V 类标准,运行期间未发生藻类水华现象。研究表明,MABR 技术在河道水体生物修复方面具有广阔的应用前景。

3.4 用于污水处理厂的提标改造

近年来,我国对污水处理厂污水的排放要求越来越严格,越来越多的污水处理厂为响应国家节能减排的号召,将排放标准由原来的《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918—2002)中的一级 B 标准提升为一级 A 或者更高标准。然而,许多水厂由于设计原因,原有的处理单元已无法满足更加严格的排放要求,因此对污水处理厂进行提标改造势在必行。MABR 设备紧凑、所占空间小,尤其是针对低 C/N 和低挥发性残渣(VSS)的污水特性,充氧效率高,可节省运行能耗和额外碳源投加;另外,其可直接安装在现有缺氧生化反应池中,无需新增占地,适合于城市污水处理厂的提标改造。该技术在美国、加拿大、比利时等国家已有多个成功应用的工程案例,可为其在我国污水处理厂的推广应用提供参考。

4 MABR 在国外污水处理厂提标改造中的应用案例

4.1 美国 Yorkville-Bristol Sanitary District 污水处理厂

美国伊利诺伊州 Yorkville-Bristol Sanitary District(简称 YBSD)污水处理厂建设了目前全球最大的 MABR 系统,处理规模为 13 700 m³/d,工程于 2017 年 10 月建成投运。该工程将原有 10 个好氧生化池升级改造成 2 个厌氧池、2 个 MABR 缺氧池和 6 个好氧池,安装了 12 套 MABR 组件至缺氧池中,将原本的好氧工艺改造成为脱氮除磷工艺,实现了在提高处理负荷的同时,强化生物脱氮除磷的目标。图 3 所示为 YBSD 污水处理厂的 MABR 膜池。

该 MABR 装置生物膜培养驯化期仅为 3 周,



图 3 YBSD 污水处理厂 MABR 膜池^[23]

Fig. 3 MABR membrane pool of YBSD wastewater treatment plant^[23]

污水处理系统正常运转后,进水 BOD₅ 负荷提高到 0.60 kg/(m³·d),相比提升改造前水厂进水 BOD₅ 负荷提高了 47%。水厂最终出水各项指标均达到了设计预期值,其中出水 BOD₅<10 mg/L、总悬浮物(TSS)<10 mg/L、NH₃-N<1.5 mg/L、TP<1.0 mg/L,氧(O₂)传递速率(OTR)和氧传递效率(OTE)的平均值分别为 10.8 g/(m²·d)和 33.3%^[23]。通过对生物膜微生物种群进行分析发现,氨氧化菌(AOB)和亚硝酸盐氧化菌(NOB)占到了微生物种群的 40%,比传统活性污泥法高出了 4 倍多。另外,相较于同规模新建的 CAS 工艺(投资成本 2 500 万美元,建造时间 2.5 a),MABR 工艺的投资成本仅 500 万美元,建造时间 1 a,成本和建造时间均大大降低。

4.2 芝加哥 Terrence J. O'Brien 再生水厂

芝加哥 Terrence J. O'Brien 再生水厂 1928 年开始运行,服务人口 130 万人,处理能力为 1.26×10⁶ m³/d,处理工艺以“初沉池—传统活性污泥反应池—紫外(UV)消毒”为主,是美国大芝加哥污水管理局下辖的 7 座再生水厂之一。近年来,水厂面临春季运行负荷高、现有污水处理设施抗冲击负荷能力差的问题,需要进行生化处理设施的升级改造。为此, Terrence J. O'Brien 再生水厂建设了三级硝化的 MABR 中试示范项目,目的是对 MABR 反应器在大型污水厂低温、高水力负荷条件下,对水中 TSS 和氮的去除效果和能耗情况进行评估,同时测试其能否满足未来的磷排放要求。

项目开始于 2015 年,分为 2 个实验周期,第 1 周期 145 d,膜箱内含有 64 个模块组件;第 2 周期 151 d,膜箱内含有 48 个模块组件。整个反应阶段,膜箱生物膜厚度维持在 200~300 μm 的范围内,均未发现膜漏损和生物膜过度积累的问题。在最佳反

应条件下,64 个模块组件和 48 个模块组件的充氧(O_2)动力效率分别达到了 4.0、3.6 kg/(kW·h)。项目组与著名的污水建模公司 Hydromantis 公司合作,基于成熟的 MBBR 工艺模型,开发了 MABR 生物膜模型,通过 GPS-X 模拟软件对 MABR 的表现进行预测。模拟结果显示,MABR 技术能在现有设施条件下完成改造,结合了 MABR 技术的改造工程能在相同的处理能力且不影响硝化作用的前提下,将污泥停留时间(SRT)从 11 d 减少到 6 d,MLSS 降至低于 2 000 mg/L,有效解决了二沉池的负荷问题,同时能够满足 1.0 mg/L 的出水磷标准,无需新增反应池体积或化学除磷^[24]。项目研究结果表明,MABR 技术具有稳定的氧气传递速率,且传递的氧气大部分都用于硝化作用,能够在显著改善现有生化处理设施的同时,有效降低污水厂的能耗。

4.3 比利时 Schilde 污水处理厂

比利时 Schilde 污水处理厂是欧洲建设的第 1 座采用 MABR 技术的污水处理厂。Schilder 污水处理厂原设计处理能力为 28 000 个人口当量(包括水力和生物容量)。近年来,水厂的实际运行负荷已逐渐增加至 35 000 个人口当量,远远超出了水厂的设计处理能力。针对此问题,Schilder 污水处理厂于 2015 年进行改扩建,50%的污水流量(约 8 000 m³/d)由 MBR 系统处理,另外 50%污水流量的处理由传统活性污泥系统升级为 MABR 系统,项目由污水处理公司 Aquafin 承建。

2017 年项目建成运行后,显著改善了 Schilde 污水处理厂传统活性污泥系统的总氮去除能力,提高了生化系统的处理效能,相比于新建生化处理池,能够节约不少于 25%的基建费用。

5 结论

(1)与传统的生物膜技术相比,MABR 氧气的传质方向和氨氮、有机物的传质方向是对向流,可有效避免自养型硝化菌和异养菌在氧气上的竞争,反硝化可在远离膜表面的生物膜厌氧区或缺氧区以及悬浮的混合液内进行,实现同步硝化与反硝化。

(2)MABR 技术具有提标扩容、节能降耗、安装操作简便、抗水质冲击负荷能力强、生物膜泥龄长活性高、污泥产量少、基建运行成本低等诸多优点,适宜应用在高氨氮废水处理、农村生活污水处理、城市

河道水体生物修复、污水处理厂提标改造等领域。

(3)污水处理厂提标改造面临的主要问题是脱氮除磷,涉及的工艺复杂,所需的反应池体大,能耗高。采用 MABR 技术,无需新增占地和进行复杂的改造,即能在原有池体基础上实现营养物高效去除和扩容的目标,同时大幅降低能耗。美国、加拿大、比利时等国家已拥有多个成功应用 MABR 技术的工程案例,可为该技术在我国污水处理厂的推广应用提供参考。

(4)我国在 MABR 研究领域起步较晚,今后应加强对 MABR 系统关键影响因子、异向传质生物膜的理化及流变特性、反应机理以及与其他技术耦合应用等方面的研究,开发廉价膜组件,进一步提升系统性能,降低设备能耗,使 MABR 技术具有更广阔的应用前景。

参考文献

- [1] TIAN Hailong, HU Yanzhuo, XU Xingjian, et al. Enhanced wastewater treatment with high *o*-aminophenol concentration by two-stage MABR and its biodegradation mechanism[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 289: 121649.
- [2] CASTRILLO M, DÍEZ-MONTERO R, ESTEBAN-GARCÍA A L. Mass transfer enhancement and improved nitrification in MABR through specific membrane configuration[J]. *Water Research*, 2019, 152: 1–11.
- [3] 张文丽, 程芳, 丁小洋. 曝气压力对 MABR 中同步硝化反硝化脱氮的影响[J]. *环境工程*, 2017, 35(10): 55–60.
- [4] 樊金鹏, 田海龙, 李宝安. MABR 及其在工业废水处理方面的应用[J]. *化学工业与工程*, 2019, 36(1): 59–63.
- [5] LI Peng, ZHAO Dexi, ZHANG Yunge, et al. Oil-field wastewater treatment by hybrid membrane-aerated biofilm reactor (MABR) system[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 264: 595–602.
- [6] MARTIN K J, NERENBERG R. The membrane biofilm reactor (MBFR) for water and wastewater treatment: Principles, applications, and recent developments[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 122: 83–94.
- [7] WEI Xin, LI Baoan, ZHAO Song, et al. COD and nitrogen removal in facilitated transfer membrane-aerated biofilm reactor (FT-MABR)[J]. *Journal of Membrane Science*, 2012, 389: 257–264.
- [8] GARCIA-GONZALEZ M C, VANOTTI M B, SZOGI A A. Recovery of ammonia from swine manure using gas-permeable membranes: Effect of aeration[J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 152: 19–26.
- [9] HOUWELING D, LONG Zebo, PEETERS J, et al. Nitrifying below the “Washout” SRT: Experimental and modeling results for a hybrid MABR/activated sludge process [C] // WEFTEC. Proceeding of the Water Environment Federation, Virginia, 2018.

- [10] KUNETZ T E, OSKOUIE A, POONSAPAYA A, et al. Innovative membrane-aerated biofilm reactor pilot test to achieve low-energy nutrient removal at the Chicago MWRD[C]//WEFTEC. Proceeding of the Water Environment Federation, New Orleans, 2016.
- [11] PELLICER-NACHER C, SMETS B F. Structure, composition, and strength of nitrifying membrane-aerated biofilms[J]. Water Research, 2014, 57: 151-161.
- [12] SUNNER N, LONG Zebao, HOUWELING D, et al. MABR as a low-energy compact solution for nutrient removal upgrades—Results from a demonstration in the UK[C]//WEFTEC. Proceeding of the Water Environment Federation, Virginia, 2018.
- [13] TIAN Hailong, LIU Jie, FENG Tengfeng, et al. Assessing the performance and microbial structure of biofilms adhering on aerated membranes for domestic saline sewage treatment[J]. RSC Advances, 2017, 7(44): 27198-27205.
- [14] HOU Feifei, LI Baoan, XING Minghao, et al. Surface modification of PVDF hollow fiber membrane and its application in membrane aerated biofilm reactor(MABR)[J]. Bioresource Technology, 2013, 140: 1-9.
- [15] TIAN Hailong, ZHAO Jieyu, ZHANG Hongyu, et al. Bacterial community shift along with the changes in operational conditions in a membrane-aerated biofilm reactor[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2015, 99(7): 3279-3290.
- [16] 张杨, 李庭刚, 强志民, 等. 膜曝气生物膜反应器研究进展[J]. 环境科学学报, 2011, 31(6): 1133-1143.
- [17] TERADA A, HIBIYA K, NAGAI J, et al. Nitrogen removal characteristics and biofilm analysis of a membrane-aerated biofilm reactor applicable to high-strength nitrogenous wastewater treatment[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2003, 95: 170-178.
- [18] 李意, 张凯松. MABR 处理二级出水深度脱氮的中试研究[J]. 工业水处理, 2018, 38(1): 35-38.
- [19] 陈文华, 潘超群, 厉雄峰, 等. MABR 技术在农村生活污水处理上的应用[J]. 水处理技术, 2019, 45(5): 126-128.
- [20] 李保安, 闫庆元, 于文志, 等. 无泡曝气膜生物反应器去除生活污水有机物的研究[J]. 膜科学与技术, 2009, 29(6): 56-59.
- [21] 李保安, 李鹏. MABR 处理受污染河道水的试验研究[C]. 中国—欧盟膜技术研究与应用研讨会论文集. 北京: 膜科学与技术编辑部, 2015.
- [22] 李浩, 李鹏, 李波, 等. MABR 用于城市景观河道水体修复的研究[J]. 膜科学与技术, 2016, 36(6): 101-107.
- [23] UNDERWOOD A, MCMAINS C, COUTTS D. Design and startup of the first full-scale membrane aerated biofilm reactor in the United States[C]//WEFTEC. Proceeding of the Water Environment Federation, Virginia, 2018.
- [24] PEETERS J, ADAMS N, LONG Z, et al. Demonstration of innovative MABR low-energy nutrient removal technology at Chicago MWRD[J]. Water Practice and Technology, 2017, 12(4): 927-936.
- [作者简介] 石岩(1980—), 博士, 正高级工程师。E-mail: 13920090062@163.com。通讯作者: 段云霞, 博士, 正高级工程师。E-mail: duanyx@126.com。
- [收稿日期] 2021-06-16(修改稿)

(上接第 21 页)

- [67] LI G, WU D, DAI Z. The application of membrane technology in concentrating soybean oligosaccharides[J]. Membrane Science and Technology, 2002, 22(1): 29-31.
- [68] 李通. 利用豆制品废水(黄浆水)工业化生产面包酵母和药用酵母[J]. 上海调味品, 1982(1): 40-43.
- [69] YONEZAWA N, MATSUURA H, SHIHO M, et al. Effects of soybean curd wastewater on the growth and hydrocarbon production of *Botryococcus braunii* strain BOT-22[J]. Bioresource Technology, 2012, 109: 304-307.
- [70] WANG Shikai, WANG Xu, MIAO Jing, et al. Tofu whey wastewater is a promising basal medium for microalgae culture[J]. Bioresource Technology, 2018, 253: 79-84.
- [71] YU Yue, ZHU Xuan, SHEN Yubiao, et al. Enhancing the vitamin B12 production and growth of *Propionibacterium freudenreichii* in tofu wastewater via a light-induced vitamin B12 riboswitch[J]. Appl. Microbiol. Biotechnol., 2015, 99(24): 10481-10488.
- [72] 蒋和团. 大豆分离蛋白生产废水污染治理的综合分析[J]. 工业水处理, 2010, 30(4): 77-80.
- [73] 潘登, 文志军, 董新华, 等. UASB/生物接触氧化工艺处理豆制品废水[J]. 中国给水排水, 2007, 23(18): 59-62.
- [74] 王宗华, 石智慧, 王志钦. 豆制品废水处理工程[J]. 水处理技术, 2010, 36(10): 125-127.
- [75] 李善评, 王兆祥, 庞艳, 等. 二级厌氧生物滤池处理大豆加工废水[J]. 工业水处理, 2006, 26(7): 68-71.
- [76] 梁延周. 豆制品生产废水处理工程[J]. 给水排水, 2007(6): 60-62.
- [77] 田葳, 张伦秋. 水解酸化-SBR 工艺处理豆腐加工废水[J]. 中国给水排水, 2017, 33(10): 116-119.
- [78] 郑海军, 郑重, 刘会成, 等. 豆制品生产工艺废水处理工艺设计[J]. 水处理技术, 2012, 38(7): 128-130.
- [79] 李宁, 陈云翔, 姜友蕾, 等. 厌氧-好氧工艺处理豆制品废水[J]. 中国给水排水, 2014, 30(20): 130-132.
- [作者简介] 王廷林(1997—), 硕士研究生。电话: 19121732843。通讯作者: 陈小光, E-mail: cxg@dhu.edu.cn。
- [收稿日期] 2021-06-15(修改稿)