

姚亮,张强,李鹏. 多级AO+MBR工艺在污水处理厂高排放标准提标改造中的应用[J]. 净水技术,2023,42(3):164-173.

YAO L, ZHANG Q, LI P. Application of multistage AO + MBR processes in upgrading and reconstruction of stricter discharge standard of WWTP[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(3): 164-173.

多级AO+MBR工艺在污水处理厂高排放标准提标改造中的应用

姚亮*, 张强, 李鹏

(北京恩菲环保股份有限公司, 北京 100038)

摘要 由于排放标准的提高和进水水质的变化,河北省K污水处理厂需进行提标改造,改造后处理规模不变,出水水质满足《大清河流域水污染物排放标准》(DB 13/2795—2018)中的重点控制区排放限值。基于来水中含有部分工业废水、进水水质波动范围大、占地受限等因素,采用了多级AO生物池+膜生物反应器(MBR)工艺;通过对原工艺单元进行充分挖潜利旧,对原连续进水循环式活性污泥(CASS)出水池局部加高增加了总停留时间,改造后的处理工艺运行稳定,满足出水要求,达到提高后的排放标准[$\text{COD}_{\text{Cr}} \leq 30 \text{ mg/L}$ 、氨氮 $\leq 1.5 \text{ mg/L}$ (水温 $\leq 12 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,氨氮 $\leq 2.5 \text{ mg/L}$)、总氮 $\leq 15 \text{ mg/L}$ 、总磷 $\leq 0.3 \text{ mg/L}$],可为高排放标准下的污水处理厂提标改造提供借鉴经验。

关键词 脱氮除磷 高排放标准 多级生物处理 提标改造 膜生物反应器(MBR)

中图分类号: TU992 文献标识码: B 文章编号: 1009-0177(2023)03-0164-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.03.021

Application of Multistage AO + MBR Processes in Upgrading and Reconstruction of Stricter Discharge Standard of WWTP

YAO Liang*, ZHANG Qiang, LI Peng

(Beijing ENFI Environmental Protection Co., Ltd., Beijing 100038, China)

Abstract Because of the improvement of discharge standards and the change of influent water quality, the K wastewater treatment plant (WWTP) in Hebei Province needs to be upgraded and reconstruction. After upgrading and reconstruction, the treatment capacity is the same as before, and the effluent quality needs to meet the discharge standards of the key control areas in the *Discharge Standard of Water Pollution in Daqing River Basin* (DB 13/2795—2018). By factors of some industrial wastewater contained in the influent, great fluctuation of water quality and limited land occupation, the multistage AO + membrane bio-reactor (MBR) process is applied in the upgrading and reconstruction. By fully digging the potential of the existed treatment units, the total hydraulic retention time (HRT) is increased by partly heightening the original CASS outlet tank. The effects show that the treatment process after upgrading and reconstruction is stable, effluent water quality can meet the discharge requirements and reach the new standard [$\text{COD}_{\text{Cr}} \leq 30 \text{ mg/L}$, ammonia nitrogen $\leq 1.5 \text{ mg/L}$ (when water temperature is $\leq 12 \text{ }^\circ\text{C}$, ammonia nitrogen $\leq 2.5 \text{ mg/L}$), TN $\leq 15 \text{ mg/L}$, TP $\leq 0.3 \text{ mg/L}$]. These can provide experiences for the upgrading and reconstruction of WWTPs under stricter discharge standard.

Keywords nitrogen and phosphorus removal stricter discharge standard multistage biological treatment upgrading and reconstruction membrane bio-reactor (MBR)

污水处理厂是城镇基础设施的重要组成部分,伴随国家及人民对环境质量重视程度的日益提升,国内各地相继出台了更高的污染物排放标准。污水

处理标准经历了从《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级B提升至一级A,再到更为严格的地方标准的提标。即部分地方在达到一级A的前提下,对部分污染物排放指标提出了参考《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中Ⅲ类水、Ⅳ类水,甚至Ⅱ类水的水质标准要求,大量污

[收稿日期] 2022-02-08

[通信作者] 姚亮(1983—),男,硕士,主要研究方向为污水处理技术及应用,E-mail:625679637@qq.com。

水处理厂已经开展或即将面临提标改造。然而,在污水处理厂的早期建设中,污水处理工艺以 AAO、氧化沟、序批活性污泥法(SBR)及其变形工艺[连续进水循环式活性污泥法(CASS)、间歇进水循环活性污泥法(CAST)]为主。随着城市雨污分流后纳管污水污染物浓度上升及排放标准的提升,出水水质难以稳定达标,同时又面临多次提标后厂内已无预留用地、周边无拓展空间、新增占地难、改造工期紧、不停产改造等问题。因此,针对不同情况的污水处理厂,选择合适的处理工艺以满足提标改造需求,已经成为当前污水处理的热点及难点^[1-2]。

本文以河北省 K 污水处理厂为例进行分析。该厂面临上述情况,于 2013 年建成,设计处理量为 2.0 万 m³/d,处于城市的高新技术开发区。来水水源主要为服务范围内的生活污水及工业废水,其中工业废水占比约为 40%。出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级 A 标准,达标后排入厂区南侧的排干渠,最终汇入北拒马河。根据 2018 年河北省环保部门发布实施的地方标准《大清河流域水污染物排放标准》(DB 13/2795—2018),要求位于流域重点控制区的现有及新(改、扩)建城镇污水处理厂从 2021 年 1 月 1 日起执行表 1 中重点控制区排放限值。因此,

需对污水处理厂进行提标改造,以满足该排放要求。本文通过对提标改造难点进行分析,立足原有工艺单元的现状情况,充分挖潜利旧,提出了改造路线。其中,核心生化系统采用多级 AO+膜生物反应器(MBR)工艺,尽量避免大拆大建,改造完成后对运行效果进行了分析。

1 改造前后的处理水量及设计进出水水质

污水处理厂原设计规模为 2.0 万 m³/d,实际污水进水量约为 1.7 万 m³/d,基本达到设计规模。考虑厂内无预留用地,且无法新增占地,本次工程处理规模维持 2.0 万 m³/d。

来水水源为服务区域内的生活污水及工业废水,其中城市高新技术开发区企业主要为食品、造纸、机械加工、制药等,进水污染物浓度较高,含有部分难降解污染物。根据污水处理厂近年(2016 年—2018 年)的来水水质中主要污染物的浓度监测数据,取 90%的保证率,并考虑雨污分流后污染物浓度的上升趋势,留有一定的余量,确定本次提标改造设计进水水质。提标改造后出水执行《大清河流域水污染物排放标准》(DB 13/2795—2018)中表 1 的重点控制区排放限值要求。改造前后的设计进出水水质如表 1 所示。

表 1 改造前后的设计进出水水质

Tab. 1 Water Quality of Influent and Effluent before and after Reconstruction

水质指标	COD _{Cr} /(mg·L ⁻¹)	BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	SS/(mg·L ⁻¹)	氨氮/(mg·L ⁻¹)	总氮/(mg·L ⁻¹)	总磷/(mg·L ⁻¹)
改造前设计进水水质	400	120	250	25	30	3.5
改造前设计出水水质	50	10	10	5(8)	15	0.5
改造前实际进水	200.0~600.0	85.0~165.0	160.0~420.0	16.00~42.00	19.0~50.0	1.00~5.50
改造前实际出水	22.0~47.0	2.0~7.0	2.5~7.5	0.50~6.50	1.5~14.5	0.03~0.48
改造后设计进水水质	500	220	310	35	40	4
改造后设计出水水质	30	6	5	1.5(2.5)	15	0.3

注:氨氮括号外数值为水温>12℃时的控制指标,括号内数值为水温≤12℃时的控制指标。

2 提标改造技术路线

2.1 提标改造难点分析

(1) 改造前运行情况

K 污水处理厂原污水处理工艺为“预处理+CASS 生物池+斜板沉淀池+滤布滤池+消毒池”,原工艺流程如图 1 所示。

污水处理厂在 2016 年—2018 年的主要污染物去除情况为进水 COD_{Cr} 平均质量浓度为 265.2 mg/L,

出水 COD_{Cr} 平均质量浓度为 36.1 mg/L,平均去除率可达 86%左右;进水 BOD₅ 平均质量浓度为 115.3 mg/L,出水 BOD₅ 平均质量浓度为 4.5 mg/L,平均去除率可达 96%左右;进水 SS 平均质量浓度为 236.5 mg/L,出水 SS 平均质量浓度为 5.6 mg/L,平均去除率可达 98%左右;进水氨氮平均质量浓度为 28.60 mg/L,出水氨氮平均质量浓度为 3.50 mg/L,平均去除率可达 88%左右;进水总氮平均质量浓度

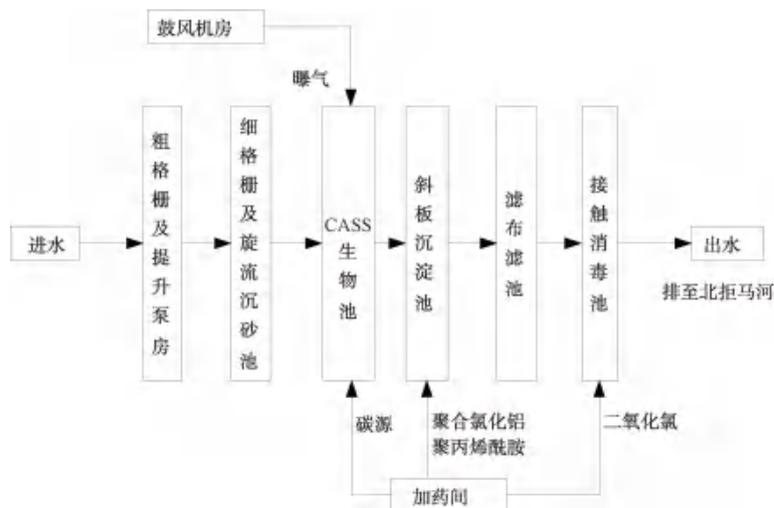


图1 改造前污水处理工艺流程

Fig. 1 Process Flow of Wastewater Treatment System before Reconstruction

为 33.5 mg/L,出水总氮平均质量浓度为 12.7 mg/L,平均去除率可达 62%左右;进水总磷平均质量浓度为 2.86 mg/L,出水总磷平均质量浓度为 0.41 mg/L,平均去除率可达 86%左右。

根据上述分析并结合表 1 可知,污水处理厂进水污染物浓度波动范围大,主要指标普遍存在高于原设计进水水质的现象;进水主要指标平均值接近(COD_{Cr}、BOD₅、SS、总磷)及超过(氨氮、总氮)原设计进水;原设计进水保证率较低,实际为 70%~85%;出水水质指标能达到原设计要求(一级 A),但距离提标要求的高排放标准仍存在很大差距。

(2) 提标改造难点

原处理工艺缺乏深度处理单元,受工艺限制,碳氧化、脱氮除磷等污染物去除效果难以继续提升^[3-5],系统出水无法满足新排放标准的要求。主要提标改造难点分析如下。

①随着服务区域内社会经济的发展,进水水质更为复杂,实际来水水质波动大,且雨污分流后进水污染物浓度增加,主要污染物指标,如 COD_{Cr}、总磷、总氮、氨氮均比之前的设计值有不同程度的提高。原工艺对难降解 COD_{Cr} 去除能力弱,出水 COD_{Cr} 较高;生物脱氮、除磷能力弱,出水总氮、总磷较高。

②提标后出水水质要求高,除总氮指标外,其余水质指标需要达到地表水 IV 类水体要求,尤其是 COD_{Cr}、氨氮、总磷指标,常规工艺难以达到要求。

③对主要污染物的去除率要求均有所提高,对工艺处理效果提出了更高的要求,去除难降解

COD_{Cr}、脱氮除磷能力均需增强。

④周边用地紧张,无法新增占地。

⑤提标改造时间紧、工期短,需尽量利旧原有工艺设施,避免大拆大建。

2.2 提标改造技术思路

由于各地排放标准的提高,近年来对高排放标准下污水处理技术研究及应用逐渐增多,针对不同的污染物采取的常见技术对策如表 2 所示。根据项目的具体情况需对各级处理进行优化设计,加强处理效果,往往采取多种工艺的组合。其中,对于一级处理进行强化,常采用增加精细格栅、曝气沉砂池、初沉池(平流沉淀池、辐流式沉淀池、高密度沉淀池)等工艺;对于二级处理进行强化,常采用多级多段生物池,同时可与新技术相结合,如移动床生物膜反应器(MBBR)、MBR、短程硝化反硝化和厌氧氨氧化等,加强生物处理,提高脱氮除磷效果;对于深度处理,常采用混凝沉淀、过滤、高级氧化、活性炭吸附、膜分离等技术^[6-10]。

提标改造工艺技术路线的选取需根据进出水水质情况,结合厂内现状确定。所选处理工艺一方面需具备高效碳氧化、除磷脱氮功能,另一方面需要充分利用原有工艺单元、节省用地。基于本项目的具体情况,技术思路如下。

(1) 优选工艺、原位改造

①水质达标新增用地的潜在需求与用地有限的矛盾。进水污染物浓度的上升,出水水质的提高,一般需要增加工艺处理措施。传统活性污泥法污泥浓

表2 高排放标准下的常见技术对策
Tab. 2 Common Technical Countermeasures under Stricter Discharge Standard

基本控制项目	常见控制限值	主要对策
COD _{Cr}	20、30 mg/L	充分曝气及碳氧化、高级氧化、活性炭吸附
BOD ₅	4、6、10 mg/L	充分曝气及碳氧化
SS	5、10 mg/L	混凝沉淀过滤、膜分离
总氮	5、10、12、15 mg/L	完全硝化、充分反硝化(外加碳源)
氨氮	1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、5.0、8.0 mg/L	充分曝气、完全硝化
总磷	0.05、0.20、0.30、0.40 mg/L	生物除磷、化学除磷、降低出水SS、膜分离
色度	10、15、20倍	生物反应、过滤、消毒、高级氧化、脱色处理、膜分离
粪大肠菌	500、1 000个/L	过滤、消毒、膜分离

度低,为实现更高的COD_{Cr}、氨氮去除效果,需要增加生物池池容,往往需要新建池体或将原池体改造加高。原有深度处理单元处理效果不足时,采用常见的高效沉淀及炭砂过滤措施均需要增加用地。

然而,污水处理厂占地面积仅为2万m²,布局紧凑,厂内无预留用地;且周边用地紧张,无法新增占地。因此,需在现有厂区内,对原有工艺构建筑物充分挖潜,进行原位改造,优选占地少的工艺。

②以提高污泥浓度降低总容积需求,力求新增工艺段最少,新增措施占地最小,局部改造、插缝建设。基于现状情况,采用常规工艺难以满足,因此,提标改造工程核心生物处理采用多级AO+MBR的组合工艺。该工艺充分发挥了传统的AAO活性污泥法与MBR膜工艺的优势,可高效去除有机污染物,将污水中的氨氮完全硝化,多级AO生化池则进一步增强了生物系统的反硝化脱氮功能^[11-12]。MBR膜工艺可以进行高效的泥水分离,实现了水力停留时间(HRT)和污泥龄(SRT)的完全分离,无须单独设置沉淀单元,在节省占地面积上有明显优势。通过将大量的混合液回流至生物池,提高了整个系统的污泥浓度,可达传统工艺的2~4倍,在一定程度上解决了生物池池容无法增加的不利情况,可尽量节省用地。同时,提高生物系统各种污染物的去除效率,抗冲击负荷能力明显增强,非常适用于高排放标准下的污水处理系统^[13-15]。

(2)加强一级处理

考虑有效利用原水碳源,避免反硝化营养不足情况,不再另设初沉池,通过增加膜格栅对一级处理进行加强,进一步去除污水中的杂质、毛发及微小颗粒等,同时保障膜系统的安全运行。

(3)加强深度处理

MBR具有高效的泥水分离作用,同时起到了深度处理的效果,无需再增加混凝沉淀过滤措施。考虑进水中含有部分难降解的工业废水,采用臭氧对MBR出水进行深度处理,可保障水质达标^[16-17]。

因此,将核心处理工艺改为多级AO+MBR的组合技术,既可满足本项目污水处理的目标要求,同时实现现有厂区用地范围内的原位改造:新增膜格栅、臭氧池利用厂内绿地在上下衔接工艺段附近插缝建设;生物池原地改造;将斜板池拆除原址改建膜池。

3 工艺流程

提标改造后的污水处理工艺为“粗格栅+提升泵池+细格栅+旋流沉砂池+膜格栅+多级AO生物池+MBR膜池+臭氧氧化池+接触消毒池”,工艺流程如图2所示。

因此,提标改造主要内容仅包括新建膜格栅1座、将CASS池改造为多级AO生物池、新建MBR膜池及MBR设备间1座(斜板沉淀池原址改建)、新建臭氧发生间及臭氧接触池1座。改造期间增加临时处理装置,采用超磁一体化设备替代斜板沉淀池。其中膜格栅、臭氧氧化池利用厂内空地或绿地建设,其他工艺单元均为利旧处理。

4 主要工艺设备参数

4.1 预处理

设计规模为2.0万m³/d,主要包括粗格栅、提升泵房、细格栅及旋流沉砂池。本工艺单元为利旧,对无法正常使用的设备进行维修或更换。

4.2 膜格栅间

本工艺单元为新建,设计规模为2.0万m³/d。

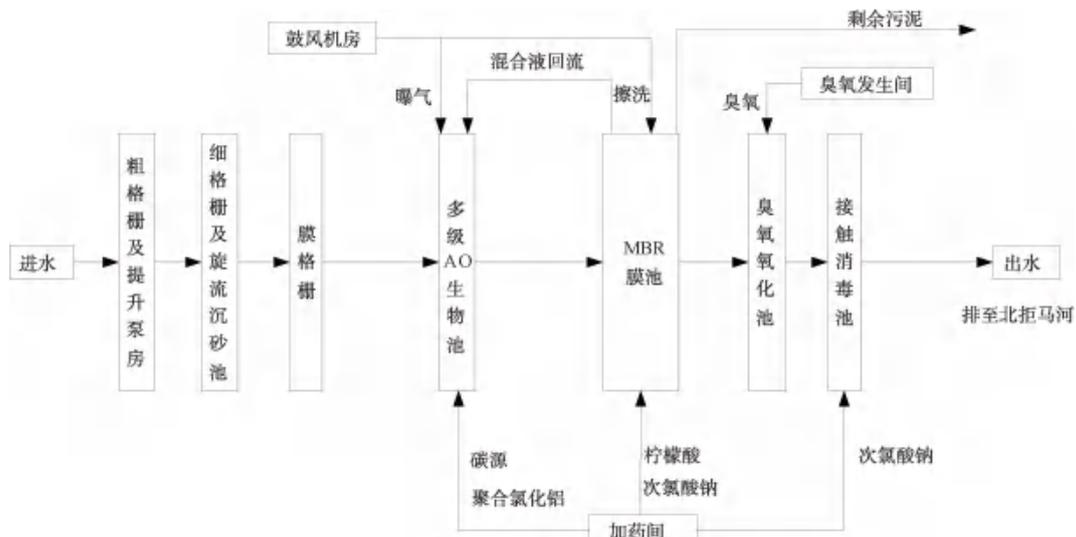


图2 改造后污水处理工艺流程

Fig. 2 Process Flow of Wastewater Treatment System after Reconstruction

设置于旋流沉砂池之后、生物池之前,对污水处理厂的一级处理进行加强,进一步去除毛发、微小颗粒、杂物、塑料碎片等,同时保障膜系统的安全运行。

膜格栅间设计2条格栅渠,采用2台内进流式网板格栅,垂直安装。格栅渠宽度为1.3 m,渠深为2.5 m,设计栅前水深为1.95 m,栅后水深为1.55 m,网板孔径为1 mm,配套高排水螺旋压榨机及高低压冲洗系统等。

4.3 多级AO生物池

生物池设计规模为2.0万 m^3/d ,本次提标由4组CASS池改造为2组多级AO生物池,对称布置,

每组处理规模为1.0万 m^3/d 。污水经过预处理后进入生物池,依次进入厌氧区、一级缺氧区、好氧区、二级缺氧区,最后经过二级缺氧区末端出水池进入MBR膜池。改造前后的生物池如图3所示。

生物池是本次改造的重点,通过对生物池参数及池体结构的校核,进行充分挖潜,最大限度地进行了老池体的有效利用,主要改造参数说明如下。

(1) 池容与停留时间

4组CASS池均设置了进水区及反应区,每组池子尺寸 $L \times B \times H$ 为50.4 m \times 18.0 m \times 6.8 m,设置总出水池1条,尺寸 $L \times B \times H$ 为72.4 m \times 4.0 m \times 5.2 m,将

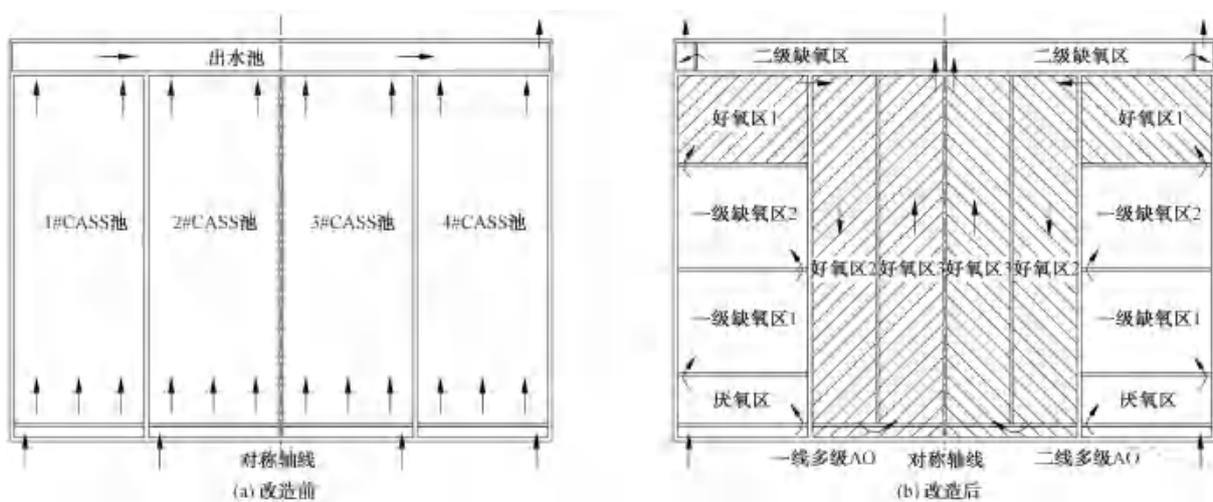


图3 生物池改造前后对比

Fig. 3 Comparison of Biological Tank before and after Reconstruction

2组CASS池改造为1组多级AO生物池。

改造中利用了原进水口,将进水区隔墙保留,而配水孔封堵一半,既避免了新开进水孔洞,也避免了污水的短流。新增横向及纵向隔墙,将生物池分隔为厌氧(A)、一级缺氧(A)、好氧(O)、二级缺氧(A)4个功能区,污水依次流入。将出水池加高作为生物反应池的二级缺氧区,增大了有效池容及总停留时间。根据设计计算生物池总HRT为23.8h。其中:厌氧区池容为795.6m³,设计HRT为1.9h;一级缺氧区(2格)池容为2658m³,设计HRT为6.4h;好氧区(3格)池容为5750m³,设计HRT为13.8h;二级缺氧区池容为709m³,设计HRT为1.7h。

(2)内回流与设备布置

多级AO生物池设置两级内回流:一是将硝化液从好氧区末端回流至一级缺氧区,进行反硝化脱氮,回流比为300%;二是从一级缺氧区末端回流活性污泥至厌氧区,与进水混合,为生物除磷提供高浓度污泥,同时缺氧环境下的混合液消除了硝酸盐对厌氧释磷的不利影响,回流比为100%。考虑来水的水质波动,为应对进水碳源不足的情况,设置多点碳源投加,即在一级及二级缺氧区均设置碳源投加点,保证生物脱氮效果;在出水池设置化学除磷加药,保障系统的除磷效果。

厌氧区、一级及二级缺氧区布置潜水搅拌器,促进污水中的微生物和污水充分混合,防止污泥沉积,提高反应效果;在好氧区布置底部曝气系统,采用管式微孔曝气器为微生物新陈代谢提供所需的氧气。

每组生物池的主要设备包括:厌氧区高速潜水推流器2套,单套功率为3kW;一级缺氧区高速潜水推流器4套,单套功率为5.5kW;二级缺氧区高速潜水推流器3套,单套功率为2.5kW;好氧区底部安装微孔曝气管,设计单位供气量为12Nm³/(h·m),可根据水质水量情况及生物池溶解氧浓度调节风机供气量;好氧区混合液回流泵2台,单泵流量为630m³/h,扬程为0.8m,功率为4kW;一级缺氧区混合液回流泵2台,单泵流量为430m³/h,扬程为0.8m,功率为2.5kW,1用1备。

4.4 MBR膜池

本工程在斜板沉淀池拆除后新建MBR膜池及设备间,MBR系统设计规模为2.0万m³/d,设置4个廊道,每个廊道既可独立运行,也可同时运行。每个廊道尺寸L×B×H为20.0m×3.6m×5.0m,有效

水深为3.5m;膜平均运行通量为12L/(m²·h);膜组器采用悬挂安装方式,中空纤维膜元件,膜表面孔径为0.04μm,膜丝材质为聚偏二氟乙烯(PVDF);膜风机擦洗曝气量为0.12m³/(m²·h),采用脉冲曝气与常曝气相结合的方式,可通过气动阀门自动切换,实现不同气量循环曝气擦洗,从而实现最大可能地延缓膜丝表面污染物污堵风险的目的,同时降低系统运行能耗。MBR系统设置了产停间歇及反洗工序,可根据产水的跨膜压差以及设定的运行周期,自动进行反洗及化学在线清洗过程。MBR膜池混合液通过大流量低扬程的回流泵回流至多级AO生物池好氧区前端,为生物池提供大量的活性污泥,使其保持较高的污泥浓度,同时可调节膜池各廊道的污泥浓度平衡,回流比设计为400%。剩余污泥经MBR系统剩余污泥泵定期外排,以保证由生物池及MBR膜池构成的生物系统进行正常的新陈代谢。

整个系统由MBR膜组器、产水泵、反洗泵、剩余污泥排放泵、抽真空设备、回流泵、膜吹扫擦洗风机、反洗装置、化学清洗设备、空压机、配套的管路阀门、电气自控仪表等构成。其中主要设备包括:膜组器40套(含4套备用),每套膜面积为1920m²;产水泵5台(4用1冷备),单泵流量为300m³/h,扬程为10m;反洗泵2台(1用1备),单泵流量为375m³/h,扬程为12m;剩余污泥泵2台(1用1备),单泵流量为200m³/h,扬程为11m;污泥回流泵3台(2用1备),轴流泵,单泵流量为1667m³/h,扬程为5m;膜擦洗风机2台(1用1备),风量为136.50m³/min,风机压力为40kPa。

4.5 臭氧氧化池

本工艺单元为新建,利用出水消毒接触池南侧绿地建设,设计规模为2.0万m³/d,MBR出水进入臭氧氧化池,利用臭氧的强氧化性,进一步去除污水中的难降解有机物,同时起到脱色的作用。臭氧氧化池设置1座3格,总HRT为38min,有效水深为5.6m;接触池采用钛盘曝气器,池顶设置尾气破坏系统;设计臭氧投加量为12mg/L;采用氧气源臭氧发生器2套(1用1备),产量为10kg/h,配套循环冷却水、仪表风系统等。

4.6 鼓风机房

将鼓风机房内的罗茨鼓风机5台(4用1备,其中2台为变频控制)更换为3台空气悬浮风机,罗茨

鼓风机风量为 $27.6 \text{ m}^3/\text{min}$, 风压为 68.8 kPa , 空气悬浮风机风量为 $60 \text{ m}^3/\text{min}$, 风压为 65 kPa 。

4.7 其他

(1) 利旧现有消毒接触池与出水计量槽, 将二氧化氯消毒改为次氯酸钠消毒, 出水经巴氏计量槽计量后外排。

(2) 利旧现有综合加药间, 对现有加药设备进行检修维护, 按照工艺加药点设计, 重新敷设加药管; 其中除磷加药采用液体聚合氯化铝, 投加点设置在多级生物池的出水区; 采用乙酸钠作为补充碳源投加至生物池, 投加点为一级缺氧区及二级缺氧区的前端。实际运行中可根据进水水质及工艺运行情况通过计量泵调整药剂投加量。

(3) 利旧现有污泥脱水系统, 对影响使用的带式脱泥机及污泥泵等设备进行检修或更换, 脱水至含水率 $\leq 80\%$ 后外运处置。

5 改造后的运行效果

提标改造工程于 2019 年下半年开工, 于 2020 年底实现通水并进行了调试及试运行。在此过程中逐步提升处理水量至设计值, 通过合理控制运行条件及参数, 出水水质稳定达到《大清河流域水污染物排放标准》(DB 13/2795—2018) 中表 1 的重点控制区排放限值要求。

根据污水处理厂的 2021 年 1 月—2021 年 12 月的监测数据, 对主要污染物指标包括 COD_{Cr} 、氨氮、总磷、总氮的去除效果进行了分析。

由图 4 可知, 进水 COD_{Cr} 质量浓度在 $102.7 \sim 663.2 \text{ mg/L}$, 平均质量浓度为 274.3 mg/L , 出水质量浓度在 $2.9 \sim 22.9 \text{ mg/L}$, 平均质量浓度为 10.9 mg/L , 平均去除率可达 96% 左右。来水 COD_{Cr} 浓度波动范围较大, 但是出水水质较为稳定, 改造后的系统具有很强的抗冲击能力。

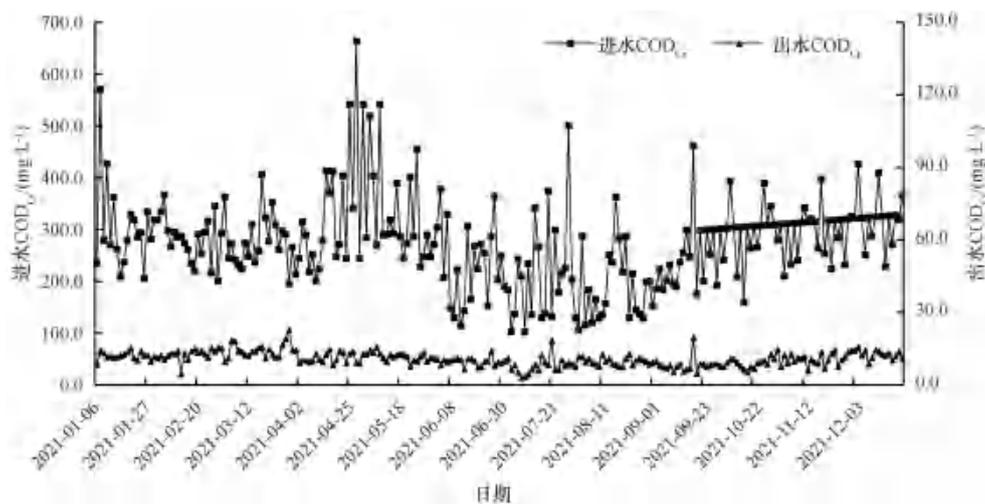


图 4 改造后 COD_{Cr} 的去除

Fig. 4 Removal of COD_{Cr} after Reconstruction

由图 5 可知, 进水氨氮质量浓度在 $5.30 \sim 52.70 \text{ mg/L}$, 平均质量浓度为 30.00 mg/L , 出水质量浓度在 $0.02 \sim 1.30 \text{ mg/L}$, 平均质量浓度为 0.29 mg/L , 平均去除率可达 99% 左右。出水指标低于排放标准的要求, 工艺具有良好的硝化能力。

由图 6 可知, 进水总磷质量浓度在 $0.70 \sim 8.40 \text{ mg/L}$, 平均质量浓度为 3.60 mg/L , 出水质量浓度在 $0.01 \sim 0.27 \text{ mg/L}$, 平均质量浓度为 0.06 mg/L , 平均去除率可达 98% 左右。出水总磷虽然有波动, 但低于 0.3 mg/L 的排放要求。

由图 7 可知, 进水总氮质量浓度在 $10.8 \sim 56.8$

mg/L , 平均质量浓度为 34.6 mg/L , 出水质量浓度在 $2.3 \sim 14.1 \text{ mg/L}$, 平均质量浓度为 8.5 mg/L , 平均去除率可达 75% 左右。在来水总氮污染物超出设计值的情况下, 工艺依然保持了很好的稳定性, 具有较强的脱氮能力。

6 经济性分析

提标改造工程总投资约为 4 200 万元, 其中一类费用约为 3 900 万元, 包括建筑工程费、设备购置费及安装工程费, 改造完成后直接运行成本为 $1.5 \sim 1.8 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

7 结论

(1) 本文以进水含有部分工业废水的河北 K 污

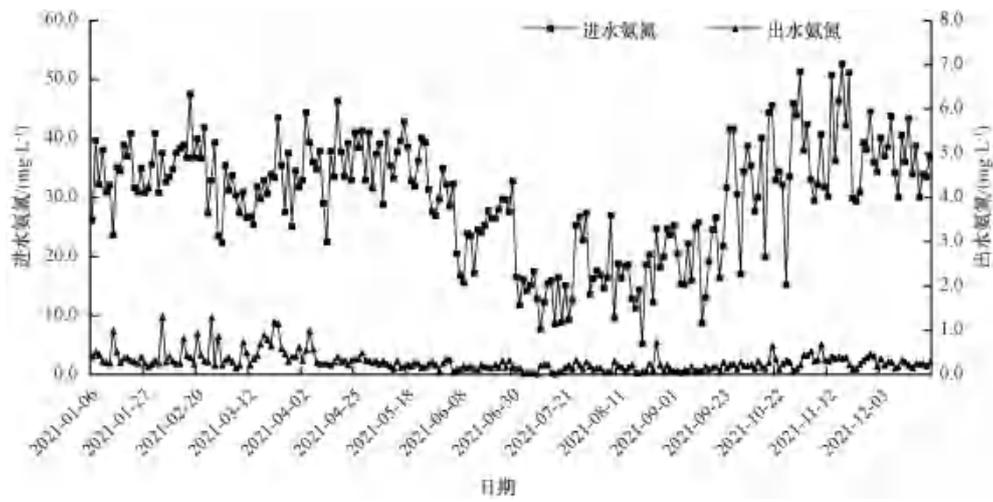


图5 改造后氨氮的去除

Fig. 5 Removal of Ammonia Nitrogen after Reconstruction

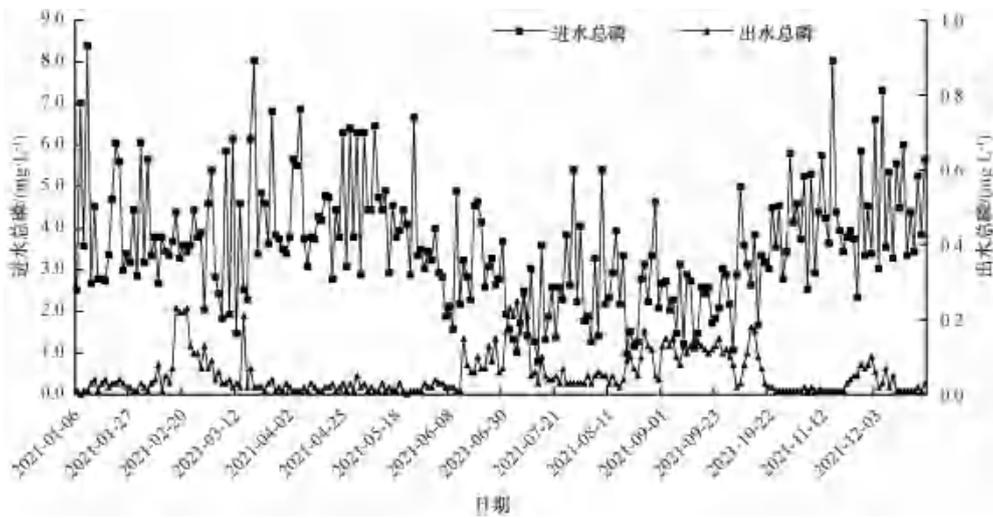


图6 改造后总磷的去除

Fig. 6 Removal of TP after Reconstruction

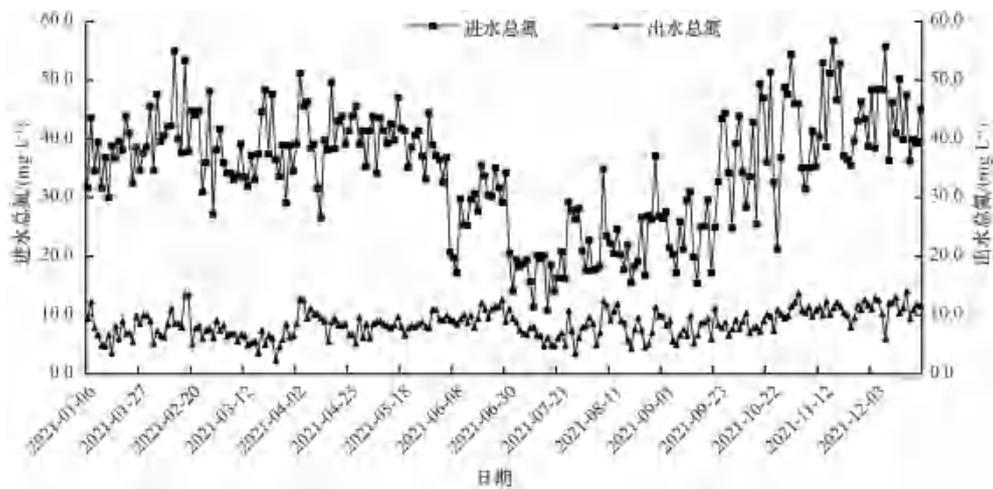


图7 改造后总氮的去除

Fig. 7 Removal of TN after Reconstruction

水厂提标改造为例,将核心处理工艺由“CASS 生物池+斜板沉淀池”调整为“多级 AO 生物池+MBR 工艺”。出水水质从《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级 A 标准提高至《大清河流域水污染物排放标准》(DB 13/2795—2018)中重点控制区排放限值,提标工艺用地节省、施工周期短,可为类似污水处理厂在高排放标准下的提标改造提供借鉴经验。

(2)结合高排放标准下的常见污水处理对策,立足本项目实际情况,改造方案对原有工艺单元进行了充分挖潜及利用,避免了大拆大建。项目对原 CASS 池进行了功能划分及出水池局部加高改造,提高了池容及停留时间,降低了改造投资。

(3)改造完成后系统运行稳定,在来水的污染物指标超出设计值的情况下,依然表现出较强的抗负荷冲击能力,对 COD_{Cr}、氨氮、总磷、总氮的平均去除率可以分别约达到 96%、99%、98%、75%。

参考文献

- [1] 蒙小俊. 城镇污水处理厂升级改造分析[J]. 环境污染与防治, 2021, 43(11): 1439-1445.
MENG X J. Analysis of upgrading and reconstruction of urban sewage treatment plants[J]. Environmental Pollution & Control, 2021, 43(11): 1439-1445.
- [2] 刘向荣, 简德武, 简爽. 高排放标准下城镇污水处理厂的提标改造探讨[J]. 中国给水排水, 2019, 35(20): 19-25.
LIU X R, JIAN D W, JIAN S. Discussion on the upgrading of municipal wastewater treatment plant under high emission standard[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(20): 19-25.
- [3] 何晓俊, 王阳, 韦慧, 等. 污水处理厂 CASS 工艺技术研究[J]. 广西城镇建设, 2014(1): 132-135.
HE X J, WANG Y, WEI H, et al. On technology improvement of CASS process applied in wastewater treatment plants[J]. Cities and Towns Construction in Guangxi, 2014(1): 132-135.
- [4] 王强, 武经宇, 李萍. CASS 工艺的特点分析及实际应用[J]. 科技创新与生产力, 2012(1): 105-106.
WANG Q, WU J Y, LI P. Analysis on features and actual application of CASS technology [J]. Sci-Tech Innovation and Productivity, 2012(1): 105-106.
- [5] 李君. CASS 工艺提标改造 A²O 工艺技术应用[J]. 山西化工, 2021, 41(3): 183-188.
LI J. Application of transformation of CASS biochemical process into A²O process technology [J]. Shanxi Chemical Industry, 2021, 41(3): 183-188.
- [6] 崔永利, 刘永代. 某高排放标准污水处理厂提标改造工程设计与运行分析[J]. 节能与环保, 2020(3): 42-45.
CUI Y L, LIU Y D. Design and operation analysis of upgrading project of a high discharge standard sewage treatment plant[J]. Energy Conservation & Environmental Protection, 2020(3): 42-45.
- [7] 李成江. 污水处理达到地表水准IV类标准的技术探讨[J]. 水工业市场, 2018(3): 7-9.
LI C J. Discussion on the technology of sewage treatment reaching quasi class IV standard of surface water [J]. Water-Industry Market, 2018(3): 7-9.
- [8] 张玲玲, 尚巍, 孙永利, 等. 高标准下天津市津沽污水处理厂提标改造效果分析[J]. 给水排水, 2019, 55(10): 37-41.
ZHANG L L, SHANG W, SUN Y L, et al. Analysis of the upgrading effect of Tianjin Jingu wastewater treatment plant under high discharge standard[J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 55(10): 37-41.
- [9] 杨晨霄, 盛铭军, 黄继会, 等. “准IV类”标准下城镇污水厂提标改造的难点与举措[J]. 工业水处理, 2020, 40(11): 15-21.
YANG C X, SHENG M J, HUANG J H, et al. Difficulties and measures for upgrading and reconstruction of urban sewage treatment plants under quasi-IV standard[J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(11): 15-21.
- [10] 张鹤清, 朱帅, 吴振军, 等. 城镇污水处理厂“准IV类”标准提标改造技术简析[J]. 环境工程, 2019, 37(6): 26-30.
ZHANG H Q, ZHU S, WU Z J, et al. Analysis of “quasi-category IV” standard upgrading and reconstruction technology for municipal wastewater treatment plants [J]. Environmental Engineering, 2019, 37(6): 26-30.
- [11] 马宏伟, 陈雅琼, 陈阳. 多级 AO-MBR 工艺用于污水处理厂提标扩建工程设计[J]. 给水排水, 2017, 53(6): 31-35.
MA H W, CHEN Y Q, CHEN Y. Application of multistage AO-MBR process in upgrading and extension engineering of water treatment plant[J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 53(6): 31-35.
- [12] 徐晓妮, 马小蕾, 吴亚萍, 等. A²/O 与 MBR 工艺在同规模城镇污水厂中的设计与应用[J]. 中国给水排水, 2017, 33(24): 21-26.
XU X N, MA X L, WU Y P, et al. Design and application of A²/O process and MBR process in the same scale wastewater treatment plants [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(24): 21-26.
- [13] 蔡鑫. 膜生物反应器结合臭氧工艺在工业区水回用处理中的应用[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(5): 36-38.
CAI X. Application of membrane bioreactor combined with ozone process in water reuse treatment in industrial area [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2019, 37(5): 36-38.
- [14] 胡小佳. 污水处理厂 MBR 工艺的应用分析[J]. 中国设备工

- 程, 2018(14): 131–133.
- HU X J. Application analysis of MBR process in wastewater treatment plant[J]. *China Plant Engineering*, 2018(14): 131–133.
- [15] 刘焘, 党朝华. MBR 工艺在污水处理厂提标改造中的工程应用[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(24): 92–94.
- LIU T, DANG Z H. Application of MBR for upgrading and reconstruction of WWTP[J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(24): 92–94.
- [16] 宋磊. 污水处理厂高标准提标改造设计——以安徽某污水处理厂为例[J]. *净水技术*, 2021, 40(6): 115–119.
- SONG L. Design of higher standard upgrading and reconstruction project——A WWTP case in Anhui [J]. *Water Purification Technology*, 2021, 40(6): 115–119.
- [17] 曾木海, 谢小龙, 杨涛. 污水处理厂提标改造工程深度处理方案[J]. *净水技术*, 2021, 40(1): 129–133, 154.
- ZENG M H, XIE X L, YANG T. Advanced treatment process for upgrading and reconstruction of WWTP [J]. *Water Purification Technology*, 2021, 40(1): 129–133, 154.

(上接第 27 页)

- [42] DING J C, WU H Q, WU P Y. Development of nanofiltration membranes using mussel-inspired sulfonated dopamine for interfacial polymerization [J]. *Journal of Membrane Science*, 2020, 598: 117658. DOI: 10.1016/j.memsci.2019.117658.
- [43] DING J C, WU H Q, WU P Y. Preparation of highly permeable loose nanofiltration membranes using sulfonated polyethylenimine for effective dye/salt fractionation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 396: 125199. DOI: 10.1016/j.cej.2020.125199.
- [44] YAO Y J, LI M, CAO X Z, et al. A novel sulfonated reverse osmosis membrane for seawater desalination; Experimental and molecular dynamics studies [J]. *Journal of Membrane Science*, 2018, 550: 470–479. DOI: 10.1016/j.memsci.2018.01.023.
- [45] ZHENG J F, YAO Y J, LI M, et al. A non-MPD-type reverse osmosis membrane with enhanced permselectivity for brackish water desalination [J]. *Journal of Membrane Science*, 2018, 565: 104–111. DOI: 10.1016/j.memsci.2018.08.015.
- [46] MI Y F, XU G, GUO Y S, et al. Development of antifouling nanofiltration membrane with zwitterionic functionalized monomer for efficient dye/salt selective separation [J]. *Journal of Membrane Science*, 2020, 601: 117795. DOI: 10.1016/j.memsci.2019.117795.
- [47] ZHANG S H, JIAN X G, DAI Y. Preparation of sulfonated poly (phthalazinone ether sulfone ketone) composite nanofiltration membrane [J]. *Journal of Membrane Science*, 2005, 246(2): 121–126.
- [48] ERKOC-ILTER S, SAFFARIMIANDOAB F, GUCLU S, et al. Surface modification of reverse osmosis desalination membranes with zwitterionic silane compounds for enhanced organic fouling resistance [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2021, 60(14): 5133–5144.
- [49] LI Y H, WANG S H, SONG X X, et al. High boron removal polyamide reverse osmosis membranes by swelling induced embedding of a sulfonyl molecular plug [J]. *Journal of Membrane Science*, 2020, 597: 117716. DOI: 10.1016/j.memsci.2019.117716.
- [50] MA Z Y, XUE Y R, YANG H C, et al. Surface and interface engineering of polymer membranes; Where we are and where to go [J]. *Macromolecules*, 2022, 55(9): 3363–3383.
- [51] LI X, CAO Y M, KANG G D, et al. Surface modification of polyamide nanofiltration membrane by grafting zwitterionic polymers to improve the antifouling property [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2014, 131(23): 41144. DOI: 10.1002/app.41144.
- [52] GUO Y S, WENG X D, WU B, et al. Construction of nonfouling nanofiltration membrane via introducing uniformly tunable zwitterionic layer [J]. *Journal of Membrane Science*, 2019, 583: 152–162. DOI: 10.1016/j.memsci.2019.04.055.
- [53] GUAN Y F, BOO C H, LU X L, et al. Surface functionalization of reverse osmosis membranes with sulfonic groups for simultaneous mitigation of silica scaling and organic fouling [J]. *Water Research*, 2020, 185: 116203. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116203.
- [54] MUSHTAQ R, ABBAS M A, MUSHTAQ S, et al. Antifouling and flux enhancement of reverse osmosis membrane by grafting poly (3-sulfopropyl methacrylate) brushes [J]. *Membranes*, 2021, 11(3): 11030213. DOI: 10.3390/membranes11030213.
- [55] WANG Y Q, LI X Y, CHENG C L, et al. Second interfacial polymerization on polyamide surface using aliphatic diamine with improved performance of TFC FO membranes [J]. *Journal of Membrane Science*, 2016, 498: 30–38. DOI: 10.1016/j.memsci.2015.09.067.
- [56] XU W X, GE Q C. Novel functionalized forward osmosis (FO) membranes for FO desalination; Improved process performance and fouling resistance [J]. *Journal of Membrane Science*, 2018, 555: 507–516. DOI: 10.1016/j.memsci.2018.03.054.
- [57] ZHOU B, HUANG F, GAO C, et al. The role of ring opening reaction chemistry of sultones/lactones in the direct zwitterionization of polyamide nano-filtration membranes [J]. *Journal of Membrane Science*, 2022, 641: 119918. DOI: 10.1016/j.memsci.2021.119918.