

述评与讨论

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2023. 12. 001

MBBR工艺应用于市政污水处理的系列解决方案探讨

周家中¹, 韩文杰¹, 吴迪¹, 张晶晶¹, 宋美芹¹, 薛磊²

(1. 青岛思普润水处理股份有限公司 青岛市绿色低碳生物膜与水环境恢复重点实验室, 山东 青岛 266510; 2. 青岛思普润智能系统有限责任公司, 山东 青岛 266510)

摘要: 针对我国污水处理用地少、标准高、难稳定等问题,移动床生物膜工艺(MBBR)展现了节地、高效、灵活、稳定的工艺优势,获得了良好应用效果,国内应用规模已达到 $2\,500\times 10^4\text{m}^3/\text{d}$ 。MBBR工艺按微生物存在主要方式分为泥膜复合MBBR工艺和纯膜MBBR工艺,分别隶属活性污泥法和生物膜法;同时纯膜MBBR耦合磁混凝沉淀形成了具备脱氮除磷功能的BFM(Biofilm & Magnetic)工艺。针对国内水质复杂、类型多样的问题,形成了MBBR工艺应用于市政污水处理的系列解决方案。针对泥膜复合MBBR工艺改造实现原池提标或30%~50%的提量、BFM工艺原位改造实现原池提标或2倍以上的提量、BFM工艺新建深度脱氮除磷实现地表水准Ⅳ类及更高排放标准、BFM工艺新建旁位处理设施实现原厂分流或提量等解决方案,探讨了各解决方案的优势、适用场景和实际应用效果,并针对泥膜复合MBBR工艺原池改造进一步提出了4条实施技术路线。MBBR工艺能够有效满足各类污水厂新、改、扩建需求,尤其是基于纯膜MBBR的BFM工艺,占地更加集约,配合装配式建设同时可展现出快速实施、灵活布置等特点,通过加载智水优控云平台,能够实现污水厂运行的管理升级与节能降耗。BFM工艺适用于市政污水、工业废水、黑臭水体、初期雨水、农村污水等多种水环境综合治理场景。围绕绿色低碳污水处理技术的开展,以悬浮载体为基体,实现基于MBBR的厌氧氨氧化工艺,是BFM工艺下一步的发展方向。

关键词: 悬浮载体; 泥膜复合; 纯膜; 磁混凝; 悬浮载体生物膜-磁混凝

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)12-0001-12

Discussion on Series Solutions of MBBR Process Applied to Municipal Sewage Treatment

ZHOU Jia-zhong¹, HAN Wen-jie¹, WU Di¹, ZHANG Jing-jing¹, SONG Mei-qin¹,
XUE Lei²

(1. Qingdao Key Laboratory of Green and Low Carbon Biofilm and Water Environment Restoration, Qingdao SPRING Water Treatment Co. Ltd., Qingdao 266510, China; 2. Qingdao SPRING Intelligent System Co. Ltd., Qingdao 266510, China)

Abstract: For municipal sewage treatment, aiming at the challenges of less land for sewage treatment, high discharge standards, and uncontrollable stability in China, the Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) process shows the advantages of land saving, high efficiency, flexibility and stability,

which has achieved good practical effects. The application scale has reached $2\,500 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ in China. According to the main mode of existence of microorganisms, MBBR process is divided into integrated fixed-film activated sludge (IFAS) and pure MBBR, which belong to activated sludge process and biofilm process, respectively. At the same time, the pure MBBR coupled with magnetic coagulation precipitation has formed BFM (Biofilm & Magnetic) process with nitrogen and phosphorus removal function. Since the sewage quality is complex and sewage types are varied, a series of solutions for the application of MBBR process to municipal sewage treatment have been formed. For the solutions of the IFAS original biochemical pool, the reconstruction could increase the sewage treatment capacity within 30%–50% of the original tank treatment standard. The BFM process in-situ reconstruction could increase the sewage treatment capacity by more than twice of the original tank standard. The new-built BFM process for deep nitrogen and phosphorus removal achieves the quasi-IV class of surface water quality standard and even higher discharge standards. The new-built BFM process with side treatment facilities increase the sewage treatment capacity of the whole plant. For each process, the advantages, application scenarios and practical application effects are discussed, and four technical routes are further proposed for the reconstruction of the original biochemical pool of IFAS. The MBBR process can effectively solve the needs of new-built, reconstruction and expansion of various WWTPs. Especially, the BFM process based on pure membrane MBBR occupies less land, showing the characteristics of rapid implementation and flexible layout with assembly construction. By loading the intelligent water optimal control cloud platform, the management upgrading, energy conservation and consumption reduction of WWTP operation can be realized. The BFM process is suitable for comprehensive treatment scenarios, such as municipal sewage treatment, industrial wastewater treatment, black and odorous water body treatment, initial runoff treatment and rural sewage treatment. Focusing on the development of green and low-carbon sewage treatment technologies, the realization of MBBR-based Anammox process with suspended carriers as the matrix is the development direction of BFM process in future.

Key words: suspended carriers; IFAS; pure MBBR; magnetic coagulation; BFM

我国城市污水治理在“十三五”期间获得了快速发展,至“十三五”结束,城市污水处理率已达到97.53%,污水厂处理能力提升至 $19\,267 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,较“十二五”末增长了37.2%。在满足处理水量不断提升需求的同时,市政污水处理也面临新的挑战:①排放标准应按需提高。自2008年开始,国内污水厂陆续完成了一级A提标改造工作,随着《长江保护修复攻坚战行动计划》《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》等国家政策的陆续发布,为进一步提高水环境质量,出水排入敏感水域的污水厂仍需在一级A标准基础上,进一步提高污水处理效率,氮、磷等营养元素指标需向地表Ⅳ类、Ⅲ类水靠拢。②活性污泥法抗逆性差。活性污泥法仍是我国污水处理的主流工艺,但我国幅员辽阔,水质地理差异较大,在应对低温、强冲击、高盐等特殊水质条件

下,活性污泥法抗逆性较弱,影响出水水质稳定性;同时污泥膨胀也是困扰活性污泥法的百年难题,一直未得到妥善解决,各污水厂季节性污泥膨胀常有发生,威胁运营安全性。③汛期面临水量冲击。我国管网建设仍不完善,雨污合流问题普遍存在,导致污水厂在汛期面临强水量冲击的问题;此外,近些年开展了“强弱项、补短板”等专项行动,部分污水厂水量大幅度提高,这些均影响了污水厂的运行稳定性。④污水厂新、改、扩建面临用地短缺窘境。城市的快速发展致使污水厂用地矛盾突出,污水厂新、改、扩建面临缺地的难题。

移动床生物膜反应器(MBBR),通过反应器内投加的悬浮载体富集微生物,实现污染物的去除。针对我国污水处理用地少、标准高、难稳定等问题,MBBR工艺展现了节地、高效、灵活、稳定的工艺优

势,获得了良好的应用效果。截至2021年,MBBR工艺在国内的应用规模已达 $2\,500\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,已经是除传统活性污泥法外,应用规模最广泛的工艺之一,作为应用广泛且运行可靠的工艺被编入《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)。随着国家水环境综合治理工作的深入,水污染治理场景更加多元化。MBBR工艺充分发挥自身优势,进行了优化升级,迭代更新,针对国内水质复杂、类型多样的问题,形成了MBBR工艺应用于市政污水处理的系列解决方案。

1 MBBR工艺简介

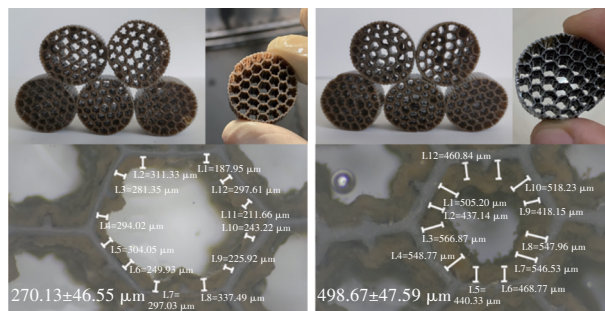
1.1 泥膜复合MBBR工艺和纯膜MBBR工艺

MBBR工艺最早应用于北欧,解决了传统活性污泥法(Activated Sludge, AS)占地大、低温耐受性差的问题^[1]。其微生物主要附着在悬浮载体上,不设置污泥回流,不富集悬浮态污泥,本质是一种连续流、移动床、生物膜法生化处理技术,属于传统流化床技术的进一步升级。2008年,国内江苏无锡芦村污水厂作为我国首座进行一级A提标改造的污水厂,在活性污泥系统中投加悬浮载体强化生化处理效果获得成功^[2-3]。该工艺系统在设备上与MBBR工艺类似,但生化系统主体仍为活性污泥,悬浮载体生物膜用于强化硝化,实质上是活性污泥-生物膜复合系统。为区分这两类工艺,将MBBR工艺作为采用悬浮载体相关工艺技术的统称,根据微生物的存在形式,分为泥膜复合MBBR工艺(IFAS)和纯膜MBBR工艺(Pure MBBR)。两者均为连续流,前者以活性污泥为主体,后者以生物膜为主体。两类MBBR工艺均包含悬浮载体及其配套的拦截、流化、进出水系统,但由于微生物的存在方式不同致使两种工艺存在关键性差异。

① 工艺本质不同

泥膜复合MBBR工艺本质仍为活性污泥法,污染物去除以活性污泥为主,生物膜为辅。图1分别展示了泥膜复合MBBR工艺和纯膜MBBR工艺中的悬浮载体生物膜。在泥膜复合MBBR工艺系统中,由于泥、膜共存,二者存在竞合关系,使得生物膜活性不能完全表达^[4]。以硝化细菌富集为例,泥膜系统中硝化细菌在悬浮载体上的相对丰度一般为3%~15%,远远高于其在活性污泥中的相对丰度,体现了生物膜富集硝化细菌的独特优势^[5]。但受实际

运行调控的影响,变化范围较大^[6]。纯膜MBBR工艺本质为生物膜法,污染物去除主要依赖于附着态的生物膜完成,生物膜对核心功能菌的富集能力更强,纯膜系统中悬浮载体上硝化细菌相对丰度一般为10%~25%,且不受悬浮态微生物竞争影响,生物膜性能得以充分释放,不仅除污效率高,且环境抗逆性也更强^[7]。



a. 泥膜复合MBBR工艺

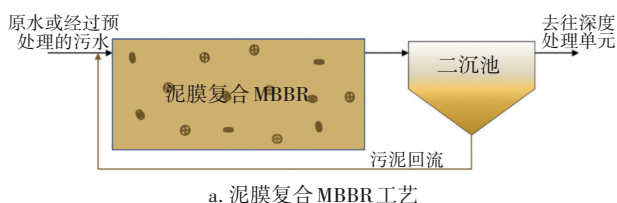
b. 纯膜MBBR工艺

图1 泥膜复合MBBR与纯膜MBBR工艺悬浮载体生物膜

Fig.1 Suspended carrier biofilm of IFAS and pure MBBR

② 工艺流程不同

泥膜复合MBBR工艺与纯膜MBBR工艺流程如图2所示。纯膜MBBR工艺的特点是不富集活性污泥,无需污泥回流,所以与泥膜复合MBBR工艺相比,在工艺流程上可不设二沉池,出水直接进入高效固液分离工艺,如磁混凝沉淀等,工艺流程更加集约,占地大幅缩减。



a. 泥膜复合MBBR工艺

b. 纯膜MBBR工艺

图2 泥膜复合MBBR工艺与纯膜MBBR工艺流程

Fig.2 Process flow of IFAS and pure MBBR

③ 解决问题不同

泥膜复合MBBR工艺主要目的是强化活性污泥系统的处理性能,解决活性污泥处理负荷不足的问题;纯膜MBBR工艺主要解决污水处理构筑物占地大、流程长、效率低的问题,其应用方式更加灵活、应用范围更加广泛^[6]。

1.2 纯膜 MBBR 工艺与 BFM 工艺

纯膜 MBBR 工艺在国内的工程应用报道最早始于微污染水处理,用于解决低基质条件下氨氮去除问题,出水氨氮可稳定低于 0.5 mg/L ,达到高排放标准要求^[8-9]。在低基质条件下,活性污泥难以有效富集,此时纯膜 MBBR 类生物膜法是对活性污泥法的替代,并获得了良好的应用效果。纯膜 MBBR 工艺在微污染水领域的成功应用、国外市政污水处理的成功经验奠定了其作为生化核心工艺用于国内市政污水处理的可行性。国内相关学者通过中试研究了纯膜 MBBR 对市政污水的处理,获得了良好的效果。相比活性污泥法,纯膜 MBBR 工艺具有更高的处理效率和更强的抗冲击负荷能力^[10]。同时,纯膜 MBBR 工艺不再富集活性污泥,避免了污泥膨胀等活性污泥问题对污水厂运营安全的威胁,提高了运维的简便性。

纯膜 MBBR 工艺作为生化工艺用于市政污水的处理,核心功能在于脱碳和脱氮,而针对污水厂核心污染物控制指标,纯膜 MBBR 工艺应用的关键在于固液分离以及深度除磷工艺的选择。

① 固液分离

在泥膜复合 MBBR 工艺中,生物膜的核心功能是硝化,以富集自养菌为主要目的,由于自养菌泥龄较长、脱落较少,污泥产量低,所以混合到普通污泥中占比极低,对后续固液分离基本没有影响;并且泥膜复合 MBBR 工艺在流程上存在二沉池和深度处理两段固液分离工艺,SS 去除较为彻底。而在纯膜 MBBR 工艺中,生物膜不仅要完成硝化,还需执行脱氮、脱碳的功能,出水 SS 性状有别于传统活性污泥法的特征。以市政污水处理为例,一方面脱落的生物膜含水率比活性污泥低,易于聚集沉降,同时脱落的生物膜 EPS 含量较高,停留时间较长时易发生内源反硝化,从而导致产气上浮;另一方面,纯膜 MBBR 工艺系统 SS 增量为 $50 \sim 150 \text{ mg/L}$,其出水 SS 高于一般深度处理工艺的进水值 ($10 \sim 50 \text{ mg/L}$),而远低于传统二沉池的进水值 ($4\,000 \sim 6\,000 \text{ mg/L}$)。所以,固液分离工艺不仅需要较短的沉降时间,而且需具备较高的固体通量,以一段沉降实现稳定的泥水分离过程。国内外曾尝试采用传统沉淀、气浮等工艺,但单独使用均难以实现 SS 稳定低于 10 mg/L 的目标,需联合其他固液分离工艺,与活性污泥法流程类似。

② 除磷

由于纯膜 MBBR 工艺不设厌氧区,不具备传统生物除磷过程,虽有 $0.5\% \sim 1.0\%$ 的同化除磷过程,但主要依赖于化学除磷,所以需选择除磷效率高、排放标准高的化学除磷工艺。磁混凝沉淀工艺具备固液分离效果好、污泥沉降速度快、固体通量负荷高的优势,是纯膜 MBBR 工艺固液分离工艺较好的选择。该工艺通过磁粉的加载可获得出水 $\text{TP} < 0.1 \text{ mg/L}$, $\text{SS} < 5 \text{ mg/L}$ 的高排放标准^[11]。为简化表述,将纯膜 MBBR 耦合磁混凝沉淀工艺简称为 BFM (Biofilm & Magnetic) 工艺^[12],工艺流程见图 3。

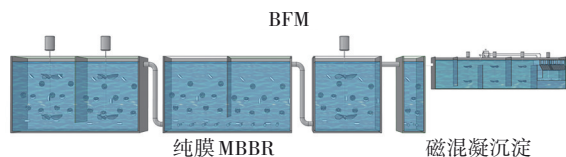


图3 纯膜 MBBR 工艺与 BFM 工艺

Fig.3 Schematic diagram of pure MBBR and BFM process

BFM 工艺继承了纯膜 MBBR 工艺的优势,具备核心脱氮除磷功能,且流程上省去了传统意义的二沉池,更加集约紧凑,使得占地大幅缩减。BFM 工艺是我国基于纯膜 MBBR 工艺处理市政污水的主要应用形式,获得了良好的工程应用效果。但在 BFM 工艺应用过程中需注意:a. 纯膜 MBBR 系统中填料填充率更高,对水力流化要求更高;b. 磁混凝沉淀需解决脱落生物膜因黏性强而裹挟磁粉导致的磁粉回收率降低问题,需进行针对性的工艺改良;c. 整个系统停留时间短,对控制要求高,应匹配自控技术,并结合物联网、大数据等先进技术,实现云平台管理,通过工艺及设备优化、系统集成,确保 BFM 工艺实现高效运行。

2 因地制宜的污水处理解决方案

MBBR 两种工艺形式的应用,为多场景污水处理系统新、改、扩建提供了多种技术路线,解决了污水处理面临的用地少、标准高、难稳定等难题,展现出了独特的工艺优势。针对市政污水处理,已形成 4 种主要解决方案,如图 4 所示。解决方案 I 为泥膜复合 MBBR 工艺原池改造,通过在生化系统镶嵌悬浮载体系统,实现原池提标以及小幅度提量,并进一步形成了 4 条技术路线;解决方案 II 为 BFM 工艺原位改造,通过将活性污泥系统改造为生物膜系统,大幅提升处理负荷,可实现污水处理能力 $2 \sim 4$

倍的提升;解决方案Ⅲ在已有系统后端新建BFM工艺,对污水厂尾水深度脱氮除磷,实现更高排放标准;解决方案Ⅳ在原厂内少量空地上新建BFM旁位系统,实现原厂分流或提量。

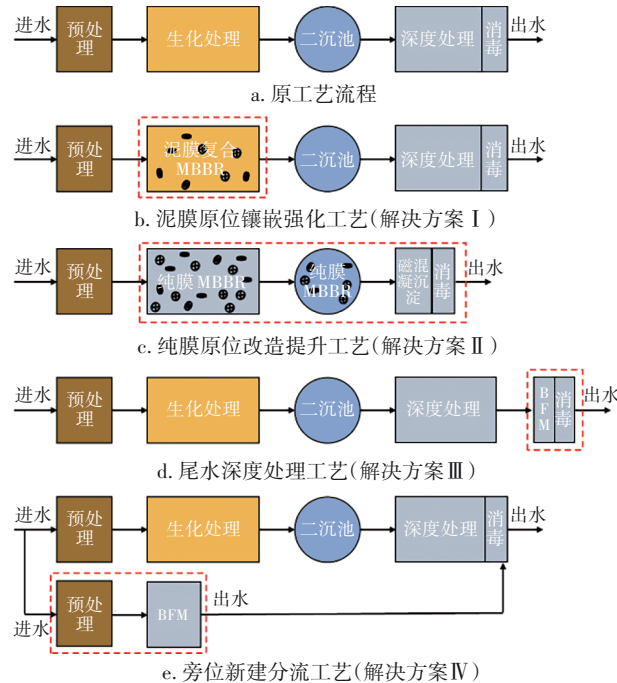


图4 基于MBBR工艺的系列解决方案

Fig.4 Series solutions based on MBBR process

2.1 解决方案 I: 泥膜复合 MBBR 工艺原池改造

解决方案 I 为国内最早成功应用的泥膜复合 MBBR 工艺原池改造方案,形式简单易行,且效果稳定,在不新增用地的情况下,强化了生化段的处理性能,可实现污水厂原位提标以及小幅提量的需求。在泥膜复合 MBBR 工艺系统中,为了充分发挥生物膜长泥龄的优势,悬浮载体体会优先选择投加在好氧区,以实现硝化功能为主。以 AAO 工艺改造为例,列举了常用的 4 条技术路线^[13],见图 5。

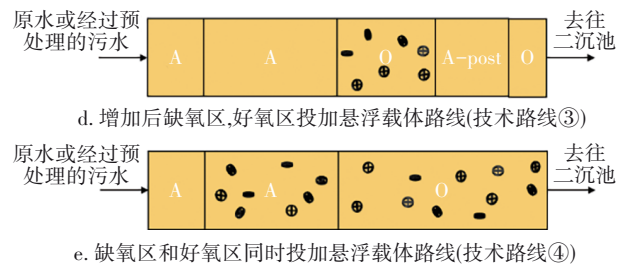
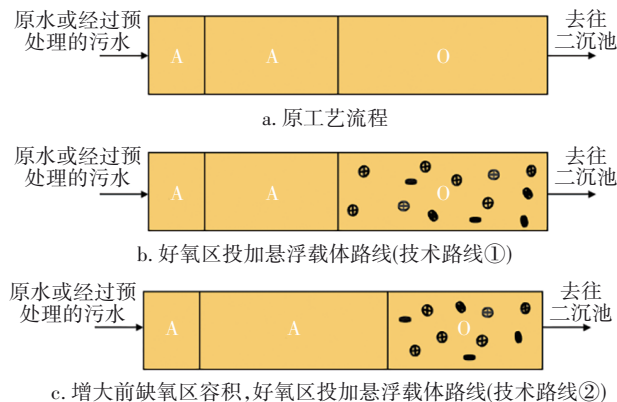


图5 解决方案 I: 泥膜复合 MBBR 工艺原位改造

Fig.5 Solution I: in-situ reconstruction of IFAS

2.1.1 技术路线①

技术路线①为好氧区直接投加悬浮载体技术,该路线土建施工少,仅需通过在好氧区设置填充区域,增设拦截系统,即可实现原位强化硝化的目的,满足氨氮高标准排放的要求。河北某污水厂 2020 年进行了提标改造,出水水质在原一级 A 标准的基础上,需将氨氮、TP、COD 提标至地表 V 类水标准。本次提标改造设计水温为 10℃,采用技术路线①实施,核心难点在于低温条件下实现稳定的硝化过程。该污水厂生化池改造前、后平面布置如图 6 所示。通过在好氧区中段投加悬浮载体实现了原池强化硝化的目标,改造完成后出水氨氮<0.5 mg/L,均值为 0.37 mg/L,氨氮去除率达到 99.2%。得益于良好的硝化效果,反硝化过程也进一步被强化,出水 TN 均值为 7.37 mg/L,较改造前降低 3~4 mg/L。

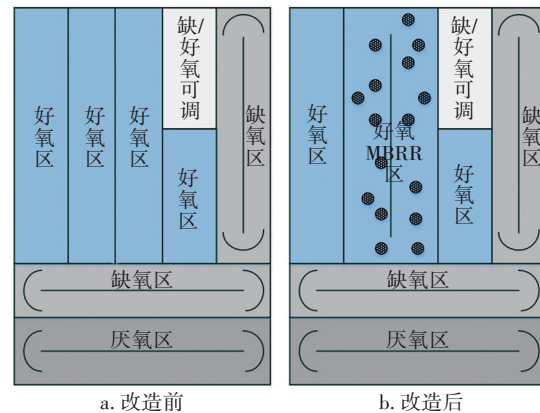


图6 河北某污水厂生化池改造前、后示意

Fig.6 Schematic diagram of biochemical tank before and after transformation of a WWTP in Hebei

2.1.2 技术路线②和③

技术路线②和③均针对系统需同时强化硝化和反硝化而设置。相较于技术路线①,技术路线②和③的核心区别是对生化池容比例进行了再划分,且同时增加了缺氧区的池容。不同点在于技术路线②增加了前缺氧区池容,系统仍以 AAO 工艺运

行;技术路线③则增加了后缺氧区,形成了AAOAO工艺形式。原水碳源充足时,技术路线②更具经济优势;对出水TN要求高,TN去除率要求较高,或原水碳源不足时,技术路线③更具有效果优势。

广东某污水厂设计规模 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 2018年进行了提标改造,要求出水水质由一级B标准提升至一级A标准^[14]。本次提标改造需同时强化硝化和反硝化。采用技术路线②实施。该污水厂生化池改造前、后平面布置如图7所示。针对TN的去除,现状缺氧区停留时间不足,改造后将部分好氧区设置成缺氧区,缺氧区的停留时间由2.5 h延长至3.47 h。在好氧区中段原位投加悬浮载体以解决好氧区硝化能力不足的问题。污水厂改造完成后出水氨氮均值低于0.5 mg/L,TN均值低于8 mg/L,脱氮效果明显优于改造前。

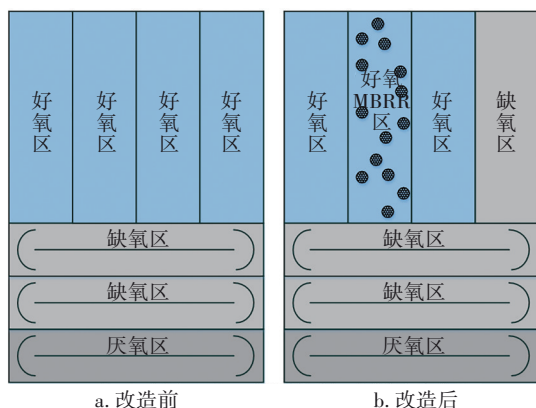


图7 广东某污水厂生化池改造前、后示意

Fig.7 Schematic diagram of biochemical tank before and after transformation in a WWTP in Guangdong

浙江某污水厂设计规模 $16 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 原出水执行一级B标准, 2017年进行了提标改造, 出水水质跨级提标至地表准Ⅳ类水, 其中出水TN < 10 mg/L^[15]。针对高TN去除要求, 采用了技术路线③进行生化池的原池改造, 将AAO工艺改为AAOAO工艺, 改造前、后平面布置如图8所示。将原好氧区池容切割出一部分改为后缺氧区和后好氧区, 并在主好氧区投加悬浮载体。改造完成后主好氧区停留时间由7.8 h降至5.3 h, 增加的后缺氧区和后好氧区停留时间分别为1.9 h和0.6 h。实际运行效果显示, 虽然好氧区HRT降低, 但由于悬浮载体的加入, 生化段出水氨氮仍能稳定低于0.5 mg/L, 抗冲击性能得到明显提升; 生化段出水TN低于8 mg/L, 较改造前多去除了8.2 mg/L, 实现了原池强化脱氮的目的。

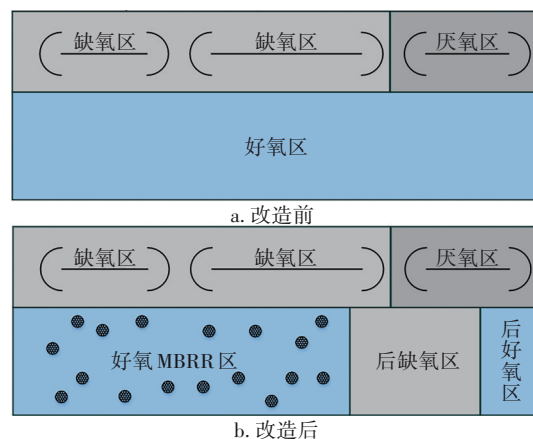


图8 浙江某污水厂生化池改造前、后示意

Fig.8 Schematic diagram of biochemical tank before and after transformation of a WWTP in Zhejiang

2.1.3 技术路线④

特殊情况下, 受池型限制或延长缺氧区HRT仍不能解决TN去除问题时, 则可在好氧区和缺氧区同时投加悬浮载体分别强化硝化和反硝化过程, 即形成了技术路线④。典型应用如唐山某污水厂提标改造项目^[16]。该污水厂设计规模 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 提标改造工程需将出水水质由二级标准跨级提标至一级A标准。项目生化池原采用卡鲁塞尔氧化沟工艺, 采用技术路线④实施原池改造后平面布置见图9。通过将卡鲁塞尔氧化沟的内外圈分别连接, 形成了外圈套内圈的形式。其中内圈为好氧区, 外圈为缺氧区, 均投加悬浮载体。改造完成后, 在进水水质超标且波动范围较大的情况下, 生化系统出水氨氮、TN均值分别为1.6、13.0 mg/L, 系统出水稳定, 且具备较强的抗低温性能以及抗水质冲击能力。

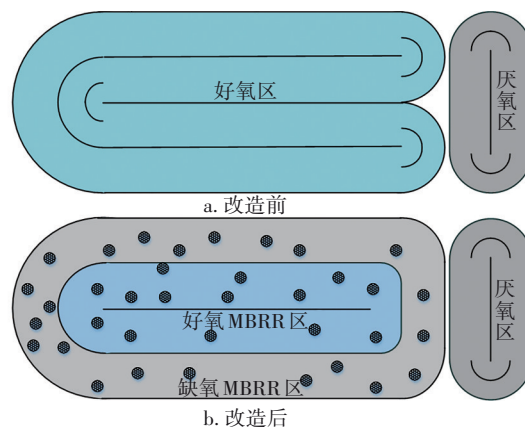


图9 唐山某污水厂生化池改造前、后示意

Fig.9 Schematic diagram of biochemical tank before and after transformation of a WWTP in Tangshan

2.1.4 技术路线比较分析

解决方案 I 采用泥膜复合 MBBR 工艺的形式实现原池提标改造,是目前应用最广泛的解决方案。除常规的 AAO 系列外,也已成功应用于其他各类生化工艺的改造,如氧化沟^[17],SBR 类工艺如 MSBR^[18]、CAST^[19]等,均获得了良好的应用效果。表 1 对比了 4 条技术路线在原厂提标中的优势以及适用场景。需要说明的是,解决方案 I 用于污水厂原池提量,需考虑二沉池的表面负荷承受能力,原池提量一般不超过 1.5 倍的设计水量。

表 1 解决方案 I 中 4 条技术路线对比

Tab.1 Four technical routes comparison of solution I

序号	技术路线	优势	适用场景
①	池容不变,好氧区直接投加悬浮载体	土建施工少,投资低	仅对出水氨氮有要求的原池提标改造
②	增加前缺氧区池容,好氧区投加悬浮载体	脱氮效果好,原水碳源利用率高	TN 去除率 $\leq 70\%$,原水碳源充足
③	增加后缺氧区池容,好氧区投加悬浮载体	脱氮效果好,脱氮不受回流比限制,外投药剂利用率高	TN 去除率 $\geq 80\%$ 或 TN ≤ 12 mg/L
④	池容不变,好氧区、缺氧区均投加悬浮载体	土建施工少	好氧区投加悬浮载体不能解决原池 TN 提标的需求

2.2 解决方案 II:BFM 原池改造

解决方案 II 采用 BFM 工艺对生化系统进行原位改造。与泥膜复合 MBBR 工艺原位改造不同,在 BFM 工艺改造过程中,二沉池不再是全厂处理能力提升的限制性因素,提量可达设计水量的 2 倍以上。同时,在改造方式上 BFM 工艺更加灵活,不仅适用于常规污水厂的改造,还适用于 SBR 等间歇流工艺的连续流改造、MBR 等无二沉池工艺的节能改造等特殊情形。

南方某污水厂设计水量 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,出水执行一级 B 标准,2020 年进行一级 A 提标改造。该厂原工艺流程如图 10(a)所示,原生化处理工艺包括 UASB 厌氧池、高负荷生物滤池、固体接触池和二沉池。但本次改造区域只涉及固体接触池和二沉池,并且仅有少部分用地可用于新建。由于固体接触池的停留时间仅有 1.08 h,远不能满足提标需求,所以本项目创新性地将二沉池改造为纯膜 MBBR 工艺系统,实现了二沉池的高效利用,改造完成后纯膜 MBBR 工艺段总停留时间达到 10.8 h。新建磁混凝

沉淀工艺总占地仅为 448 m^2 。改造完成后工艺流程如图 10(b)所示。通过对传统磁混凝沉淀工艺高剪机、磁分离机等核心设备的改良,实现了磁粉回收率 $>99.5\%$ 的目标,解决了脱落生物膜因黏性强包裹磁粉而使磁粉回收率低的问题。同时也在工程中进一步验证了磁混凝沉淀作为纯膜 MBBR 后端工艺的合理性,以一次沉淀实现彻底的固液分离。改造完成后 BFM 工艺出水 COD、BOD₅、TN、NH₃-N、TP 分别为 16.18、2.50、11.57、1.46、0.17 mg/L,出水经消毒后直接外排,未新增过滤等其他深度处理工艺,实现了原厂提标的目标。

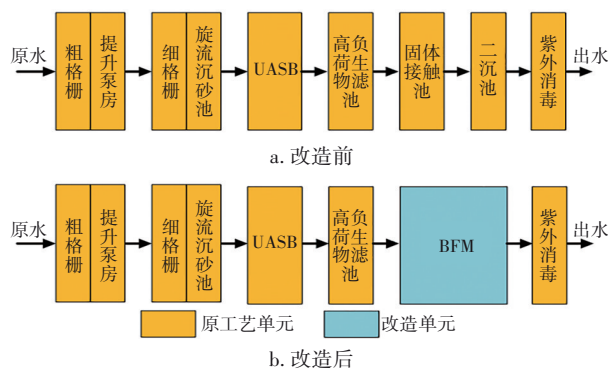


图 10 南方某污水厂提标改造前、后工艺流程

Fig.10 Process flow diagram before and after upgrading and reconstruction of a WWTP in southern China

2.3 解决方案 III:后置 BFM 深度脱氮除磷

解决方案 III 是在已有系统后新建 BFM 工艺以实现深度脱氮除磷,不改动原有生化系统,可实现污水厂的进一步提标或解决由于污水厂提量所引起的原工艺处理性能不足的问题。该方案用于尾水处理时,要求相关工艺具备低基质条件下稳定运行的能力。郑志佳等^[20]采用纯膜 MBBR 工艺处理市政污水厂二沉池出水,通过优化控制可使出水硝态氮 $<5 \text{ mg/L}$ 。南方某水质净化厂采用纯膜 MBBR 工艺去除河道水中的氨氮,在实际停留时间不足 40 min 的条件下,出水氨氮 $<0.5 \text{ mg/L}$,且展现出了较好的抗冲击性能^[21]。可见,BFM 工艺具备深度处理的潜力。

潍坊某污水处理厂设计规模为 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,出水执行一级 A 标准。2021 年进行提标改造,要求出水水质提升至地表准 IV 类水标准,其中出水总氮 $<12 \text{ mg/L}$ 。本项目采用新增深度处理 BFM 工艺以实现进一步的脱氮除磷,改造完成后污水厂工艺流程如

图11所示。

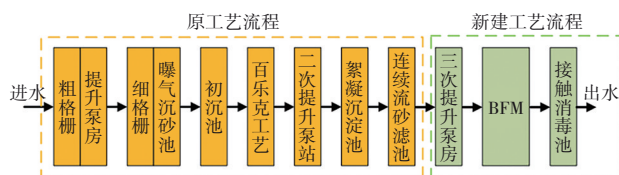


图11 潍坊某污水厂提标改造后工艺流程

Fig.11 Process flow of a WWTP after upgrading and reconstruction in Weifang

纯膜 MBBR 工艺段总 HRT 为 3.6 h, 磁混凝沉淀设计平均表面负荷为 $14.2 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。整个项目改造期间,未改动原工艺,未影响厂内各处理单元的正常运行。通过新建紧凑型 BFM 工艺,实际出水 COD、BOD₅、SS、TN、NH₃-N、TP 分别达到 19.87、2.12、4.80、8.46、0.31、0.08 mg/L,实现了污水厂原厂提标的目标。BFM 适用于低基质水处理,污水厂尾水、微污染水、黑臭水体、饮用水原水等水质浓度低,具有相似性,可进行推广应用。

2.4 解决方案Ⅳ:BFM 新建旁位处理系统

解决方案Ⅳ通过在厂区内新建集约型 BFM 污水处理设施,实现原厂分流或提量。受季节性雨季冲击以及管网提质增效的影响,污水厂面临进水量超负荷运行的问题,出水水质达标稳定性受到威胁。同时,受限于原工艺改造困难、改造周期长的问题,难以在短期内通过实施原池改造来应对污水提量问题。此种情况下,快速新建独立污水处理设施成为有效途径之一。采用 BFM 工艺可有效利用厂区内的零散土地、绿化带、道路等区域进行实施,同时采用装配式的施工方式,可快速实现原厂提量的需求。

① 烟台某污水厂项目

烟台某污水处理厂设计处理水量为 $12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,出水执行一级 A 标准。2021 年,通过新建 BFM 旁位处理设施,缓解原工艺进水超量的问题。新建项目设计处理水量为 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,出水执行地表水准 V 类标准,设计进、出水水质见表 2。新建项目于厂区道路旁绿化带实施,进水取自现状初沉池出水,经过 BFM 工艺处理后进入现状紫外消毒系统。纯膜 MBBR 工艺段缺氧区填充率为 55%,主好氧区填充率为 60%,后好氧区填充率为 65%,磁混凝沉淀工艺段设计表面负荷为 $11.57 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。项目实施完成后,吨水占地仅为 $0.14 \text{ m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$,BFM 系统仅占用原

厂 1.4% 的用地处理了全厂 7.7% 的污水,集约效果显著;BFM 工艺出水 COD、BOD₅、SS、TN、NH₃-N、TP 分别为 31.53、3.14、4.63、4.47、0.46、0.09 mg/L。在集约占地条件下实现了高排放标准,保障了全厂总出水达标。高通量测定结果表明,生物膜上不仅富集了大量的硝化菌和反硝化菌,在缺氧区生物膜上还富集了厌氧氨氧化菌,其相对丰度可达 1% 以上,为基于 BFM 工艺的主流厌氧氨氧化工艺的的实施奠定了工程基础。

表 2 烟台某污水处理厂新建 BFM 系统设计进、出水水质

Tab.2 Quality of influent and effluent designed of the new BFM system in a WWTP in Yantai

mg·L⁻¹

项目	COD	BOD ₅	SS	TN	NH ₃ -N	TP
设计进水	580	260	430	70	50	11
设计出水	40	10	10	15	3	0.4

② 广东肇庆某污水厂项目

广东肇庆某污水处理厂设计处理水量为 $11 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,出水执行一级 A 标准。在当地污水管网提质增效改造后面临 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的污水增量问题,原污水处理系统难以有效应对,需进行提量改造,以保障污水的及时有效处理。由于项目实施周期短,最终采用 BFM 工艺装配式施工方式在厂内新建独立旁位污水处理系统,解决了污水增量问题^[12]。

新建项目设计水量 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,出水执行一级 A 标准,于厂区绿化带内新建 BFM 处理设施。项目进水取自现状提升泵房,经过细格栅和旋流沉砂池进行预处理后,通过 BFM 工艺段完成核心污染物的去除,最终消毒后外排。新建项目实施完成后,吨水占地仅为 $0.067 \text{ m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$,新建 BFM 工艺系统仅占用原厂 2.5% 的用地处理了全厂 21.4% 的污水,并且仅用时 30 d 完成建设,有效缓解了进水量陡增的难题。BFM 工艺实际出水 COD、NH₃-N、TP、SS 分别为 12.17、0.80、0.30、2.14 mg/L,保障了出水水质的稳定达标。

本项目同步实施了智能控制系统,如图 12 所示。现场全部设备、仪表、控制接入智水优控云平台,实现了对污水厂运行信息的全面收集。该项目还同步配置了手机端小程序,实现随时随地的远程管理。云平台内置工艺控制系统,可实现精准控制与节能降耗,直接运行费用比人工控制降低 20% 以上。



图 12 肇庆某 BFM 新建项目智水优控平台

Fig.12 Intelligent water optimal control platform for a new BFM project in Zhaoqing

2.5 MBBR 工艺的维护结构

污水厂传统的建设形式多为混凝土现场浇筑,存在建设周期长、受环境因素影响大、技术要求高、综合造价高等问题。同时,在面临突发性环境污染的问题上,污水处理设施的建设也面临快速性、临时性、可靠性、适用性、重复利用等需求。与传统混凝土现场浇筑法相比,装配式施工工程用地小、场地易于布置、工程进度快、对空间和时间的利用率较高,具备模块化、轻量化、快速化等优点,可以很好地适应上述建设需求,具有较好的社会效益、环境效益和经济效益^[22]。

由于已有的 MBBR 解决方案中改造项目居多,所以在维护结构上仍以土建为主。而针对新建项目,已陆续采用了利浦罐、搪瓷罐、碳钢焊接等装配式维护结构,如图 13 所示。



图 13 BFM 装配式污水处理设施

Fig.13 BFM fabricated wastewater treatment facility

通过现场安装方式,用时不到 40 d 即可完成万吨级污水厂全流程的新建,大大缩短了建设周期。

此外,在节能、节地、节水、节材和环境保护方面,装配式施工方式优势也十分明显,更符合国家的低碳发展要求,其使用寿命亦可根据项目需求确定,实现长周期的稳定使用^[23]。

2.6 解决方案选择

表 3 对比了 4 种解决方案的优势以及适用场景。从整体上看,泥膜复合 MBBR 工艺更适合负荷提升需求不大的场景,如提标或少量提量,在不改动二沉池的情况下能够实现 30%~50% 的提量。基于纯膜 MBBR 的 BFM 工艺实现了流程的集约,改造方式更加灵活,破除了二沉池对污水厂新、改、扩建的限制,可实现原污水厂 2 倍以上的提量。该方案也适用于 SBR、MBR 等无二沉池工艺的改造,同时也可实现对传统固定床生物膜工艺的替代,在工艺运行上更加简便,可获得氨氮<0.5 mg/L、TN<5 mg/L、TP<0.1 mg/L 的良好应用效果。BFM 工艺可在原厂内的空地、绿化带等地实施;可用于主体生化段改造,也可以用于尾水的深度处理,应用方式更加灵活。

表 3 4 种解决方案对比

Tab.3 Comparison of four solutions

解决方案	优势	适用场景
方案 I:泥膜复合 MBBR 原池改造	生化池原池改造,紧密结合原工艺	市政污水厂原池提标或不高于 50% 的提量
方案 II:BFM 原位改造	可实现 2~4 倍的原厂提量	市政污水厂原池提标或提量,特别是高于 50% 的提量,或原厂生化段改造受限的提标,如 SBR 等间歇流工艺的连续流改造、MBR 等无二沉池工艺的节能改造
方案 III:新建 BFM 深度处理系统,实现深度脱氮除磷	不改动原工艺,通过节地新建,实现原厂提标	在原工艺无法改动下,市政污水厂的原厂提标以及微污染水、初期雨水等低基质水处理
方案 IV:新建 BFM 旁位处理系统,用于总进水分流	不改动原工艺,通过节地新建,实现原厂提量	原工艺无法改动下,市政污水厂原厂提量

图 14 展现了 MBBR 用于水环境综合解决方案,从最初 MBBR 工艺应用于市政污水处理,到现状 MBBR 工艺已实现了工业废水处理、黑臭水体治理、初期雨水处理、农村污水处理等多场景应用。实际应用时,应根据项目的实际情况因地制宜地选择解决方案,以期获得最优的实施和处理效果。

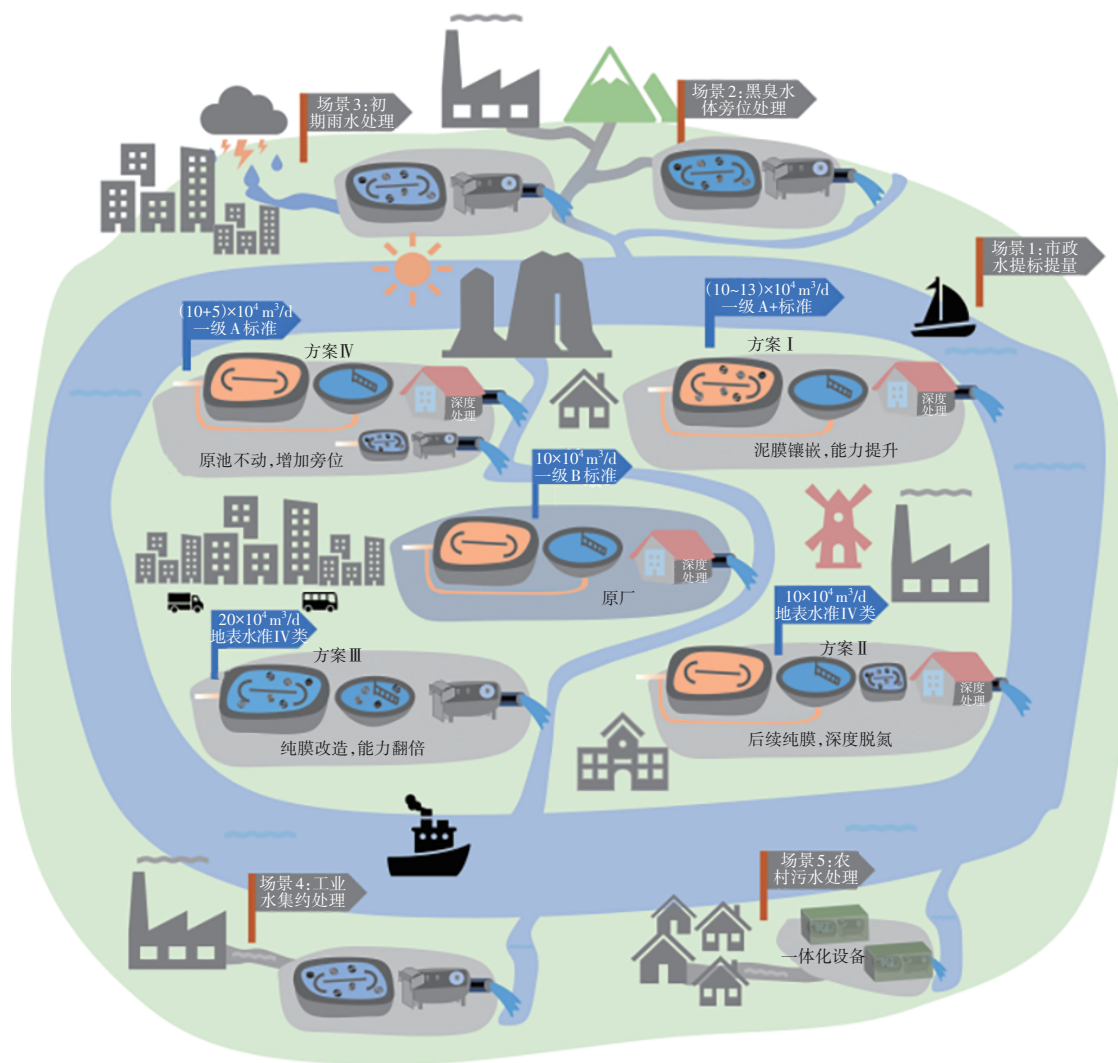


图14 基于MBBR的综合解决方案

Fig.14 Comprehensive solution based on MBBR process

3 展望

泥膜复合MBBR及基于纯膜MBBR的BFM两种工艺形式、多场景应用模式为污水处理提供了新思路。泥膜复合MBBR工艺可实现活性污泥系统处理性能的原位强化,基于纯膜MBBR工艺的BFM工艺实现了污水的集约化处理,并能够在多场景污水治理过程中实现对活性污泥工艺的替代。在国内污水厂新、改、扩建缺地的背景下,基于MBBR工艺不同应用形式的优势特点,形成了4种解决方案,分别以新、改、扩建方式因地制宜实施,有效解决了污水厂在提质增效过程中面临的缺地、高标准、难稳定的问题,获得了良好的应用效果,解决了区域水环境污染问题。

BFM工艺作为纯膜MBBR工艺的完整核心工

艺流程,与泥膜复合MBBR工艺相比,流程更加集约,生物膜性能得以充分发挥;与BAF工艺相比,无需反冲洗,运行不受滤速限制,对进水水质容忍度高;与MBR工艺相比,运行能耗低,运行维护简单,具有稳定、集约、高效等优势,配合装配式建设可展现快速实施、灵活布置等特点,加载智水优控云平台能够实现污水处理厂运行的管理升级,实现节能降耗。BFM适用于市政污水处理、工业废水处理、黑臭水体治理、初期雨水处理、农村污水处理等多种水环境治理场景。该工艺以更低的土地占用满足污水处理需求,将获得更高的效益。围绕绿色低碳污水处理技术的开展,以悬浮载体为基体,实现基于MBBR的厌氧氨氧化,是BFM工艺下一步的发展方向。

参考文献:

- [1] RUSTEN B, ØDEGAARD H. Design and operation of moving bed biofilm reactor plants for very low effluent nitrogen and phosphorus concentrations [J]. *Water Practice*, 2007, 1(5): 1-13.
- [2] QU J H, WANG H C, WANG K J, *et al.* Municipal wastewater treatment in China: development history and future perspectives [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2019, 13(6): 88.
- [3] 王翥田, 叶亮, 张新彦, 等. MBBR工艺用于无锡芦村污水处理厂的升级改造[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(2): 71-73.
WANG Zhutian, YE Liang, ZHANG Xinyan, *et al.* Application of MBBR process to upgrading and reconstruction of WWTP [J]. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(2): 71-73 (in Chinese).
- [4] 周家中, 韩文杰, 吴迪, 等. MBBR泥膜复合系统泥膜竞争关系的影响因素[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(11): 4735-4743.
ZHOU Jiazhong, HAN Wenjie, WU Di, *et al.* Factors influencing the competition between activated sludge and biofilm in hybrid MBBR nitrification system [J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(11): 4735-4743 (in Chinese).
- [5] 孙晓, 江捷, 王强, 等. 大型污水厂中填料对A²O系统微生物种群的影响[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(7): 63-68.
SUN Xiao, JIANG Jie, WANG Qiang, *et al.* Effect of suspended carrier on microbial community in A²O system in a full-scale wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(7): 63-68 (in Chinese).
- [6] 周家中, 吴迪, 郑临奥. 纯膜MBBR工艺在国内外的工程应用[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(22): 37-47.
ZHOU Jiazhong, WU Di, ZHENG Lin'ao. Engineering application of pure MBBR process at home and abroad [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(22): 37-47 (in Chinese).
- [7] 韩文杰, 吴迪, 周家中, 等. 长三角地区MBBR泥膜复合污水厂低温季节微生物多样性分析[J]. *环境科学*, 2020, 41(11): 5037-5049.
HAN Wenjie, WU Di, ZHOU Jiazhong, *et al.* Microbial diversity analysis of WWTPs based on hybrid-MBBR process in a low temperature season in the Yangtze River delta [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(11): 5037-5049 (in Chinese).
- [8] 王毅, 井添祺, 周家中, 等. 盐城市某净水厂原水预处理厂设计与运行分析[J]. *净水技术*, 2020, 39(7): 24-29, 34.
WANG Yi, JING Tianqi, ZHOU Jiazhong, *et al.* Analysis of design and operation for a raw water pretreatment plant in Yancheng City [J]. *Water Purification Technology*, 2020, 39(7): 24-29, 34 (in Chinese).
- [9] 刘妍, 滕一杰, 周家中, 等. 纯膜MBBR用于南方某大型水质净化厂改造效果分析[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(1): 1-8.
LIU Yan, TENG Yijie, ZHOU Jiazhong, *et al.* Operation effect of pure MBBR process used in a large-scale water purification plant in south China [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(1): 1-8 (in Chinese).
- [10] 陈祥瑞, 杜强强, 韩文杰, 等. 基于纯膜MBBR的紧凑型污水处理BFM中试基质转化特性[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(11): 3741-3756.
CHEN Xiangrui, DU Qiangqiang, HAN Wenjie, *et al.* Pilot test on the treatment of medium-concentration domestic sewage in northern China by BFM process based on pure MBBR [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(11): 3741-3756 (in Chinese).
- [11] 卢立念, 韩文杰, 吴迪, 等. 基于磁加载沉淀的超效分离工艺的应用[J]. *市政技术*, 2019, 37(6): 209-213.
LU Linian, HAN Wenjie, WU Di, *et al.* Application of super-efficiency separation technology based on magnetic loading precipitation [J]. *Municipal Engineering Technology*, 2019, 37(6): 209-213 (in Chinese).
- [12] 彭明, 周家中, 韩文杰, 等. 基于纯膜MBBR的BioFIMag工艺用于新建污水处理厂[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(6): 71-75.
PENG Ming, ZHOU Jiazhong, HAN Wenjie, *et al.* Application of BioFIMag process based on pure MBBR in new wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(6): 71-75 (in Chinese).
- [13] 吴迪. MBBR在国内的工程应用与发展前景[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(16): 22-31.
WU Di. Application and development prospect of MBBR in China [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(16): 22-31 (in Chinese).
- [14] 夏超, 吴志京, 郑临奥, 等. MBBR用于A²O微曝氧化沟工艺提标改造设计与运行[J]. *市政技术*, 2020, 38(3): 238-242.
XIA Chao, WU Zhijing, ZHENG Lin'ao, *et al.* Design

- and operation of the MBBR for upgrading A²O micro aeration oxidation ditch process [J]. *Municipal Engineering Technology*, 2020, 38 (3): 238-242 (in Chinese).
- [15] 滕良方, 吴迪, 郑志佳, 等. 某污水厂 Bardenpho-MBBR 准IV类水提标改造分析[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(11): 33-39.
- TENG Liangfang, WU Di, ZHENG Zhijia, *et al.* Upgrading and reconstruction to meet quasi class IV standard of surface water by Bardenpho-MBBR in a wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(11): 33-39 (in Chinese).
- [16] 张晶晶, 杨翠春, 丁鹏霖, 等. MBBR 工艺用于唐山某污水厂提标改造效能分析[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(15): 78-85.
- ZHANG Jingjing, YANG Cuichun, DING Penglin, *et al.* Efficiency analysis of MBBR process applied in upgradation of a wastewater treatment plant in Tangshan [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(15): 78-85 (in Chinese).
- [17] 周祯领, 吴迪, 韩文杰, 等. MBBR 镶嵌氧化沟在浙江某污水处理厂的提标效果分析[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(17): 1-6.
- ZHOU Zhenling, WU Di, HAN Wenjie, *et al.* Retrofitting effect of oxidation ditch embedded with MBBR in a wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(17): 1-6 (in Chinese).
- [18] 方土, 周家中, 吴迪, 等. 长三角地区某污水处理厂准IV类水提标改造分析[J]. *中国给水排水*, 2018, 34 (17): 94-99.
- FANG Tu, ZHOU Jiazhong, WU Di, *et al.* Analysis on upgrading and reconstruction of class IV surface water in a wastewater treatment plant in Yangtze River delta region [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(17): 94-99 (in Chinese).
- [19] 郑志佳, 连来喜, 刘彦华, 等. MBBR+磁混凝用于 CAST 工艺升级改造的效果分析[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(1): 7-12, 17.
- ZHENG Zhijia, LIAN Laixi, LIU Yanhua, *et al.* Upgrading and reconstruction of CAST process by MBBR and magnetic coagulation process [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(1): 7-12, 17 (in Chinese).
- [20] 郑志佳, 吴迪, 张晶晶, 等. 两级后置纯膜 MBBR 的反硝化性能研究[J]. *环境工程*, 2019, 37(9): 68-73.
- ZHENG Zhijia, WU Di, ZHANG Jingjing, *et al.* Denitrification performance of a two-stage post-MBBR [J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(9): 68-73 (in Chinese).
- [21] 刘妍, 余军, 杨忠启, 等. 微污染水处理厂纯膜 MBBR 工艺改造工程设计[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(6): 107-112.
- LIU Yan, YU Jun, YANG Zhongqi, *et al.* Design of pure MBBR process retrofitting project for a micro-polluted water treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(6): 107-112 (in Chinese).
- [22] 秦雄, 黄文海, 赵皇, 等. 装配式乡镇污水处理厂的设计与施工[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(24): 126-129.
- QIN Xiong, HUANG Wenhai, ZHAO Huang, *et al.* Design and construction of prefabricated township sewage treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(24): 126-129 (in Chinese).
- [23] 高德生, 张云宁, 欧阳红祥, 等. 供应链管理视角下装配式建筑可持续发展分析[J]. *工程管理学报*, 2019, 33(4): 15-20.
- GAO Desheng, ZHANG Yunning, OUYANG Hongxiang, *et al.* An analysis on sustainable development of prefabricated buildings from the perspective of supply chain management [J]. *Journal of Engineering Management*, 2019, 33 (4): 15-20 (in Chinese).

作者简介:周家中(1990-),男,河北张家口人,硕士,正高级工程师,主要从事水处理强化脱氮除磷技术研究工作。

E-mail:zhoujiazhong@qdspr.com

收稿日期:2022-05-06

修回日期:2022-06-05

(编辑:丁彩娟)