

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.12.015

BFM工艺用于山东某污水厂提标改造

王玉敏¹, 邵先涛², 周家中³, 苗在上⁴, 孙玉国⁴, 吴迪³

(1. 临朐县住房和城乡建设局, 山东 潍坊 262619; 2. 青岛西海岸新区工业和信息化局, 山东 青岛 266555; 3. 青岛思普润水处理股份有限公司, 山东 青岛 266510; 4. 青岛西海岸新区水务发展中心, 山东 青岛 266500)

摘 要: 山东某污水厂处理规模为 $6\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,采用新增污水处理工艺单元的方式进行地表水准Ⅳ类提标改造。采用基于生物膜法的BFM并集成活性炭吸附的技术路线。提标改造处理单元占地面积为 $0.03\text{ m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$,BFM生物池好氧区和缺氧区悬浮载体填充率分别达到55%和50%。稳定运行期间,BFM实际进水水质波动较大,在进水COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP、SS分别为16.72~37.34、0.22~4.19、9.70~14.15、0.03~0.42、6.79~9.54 mg/L的条件下,出水相应指标可稳定降至16.59~21.89、0.03~0.13、7.15~9.04、0.02~0.10、3.24~6.51 mg/L。高通量测序结果显示,生物膜在低基质条件下实现了功能菌的高效富集,好氧区硝化菌和缺氧区反硝化菌的相对丰度分别达到7.77%和16.5%。BFM工艺具有集约、高效、稳定的优势,对类似污水厂的提标改造具有借鉴作用。

关键词: 提标改造; 生物膜; 流化床生物膜反应器; 深度处理

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)12-0097-06

Application of BFM Process in the Upgrading and Reconstruction of a WWTP in Shandong Province

WANG Yu-min¹, SHAO Xian-tao², ZHOU Jia-zhong³, MIAO Zai-shang⁴,
SUN Yu-guo⁴, WU Di³

(1. Linqu County Bureau of Housing and Urban-Rural Development, Weifang 262619, China;
2. Bureau of Industry and Information Technology of Qingdao West Coast New Area, Qingdao 266555, China; 3. Qingdao SPRING Water Treatment Co. Ltd., Qingdao 266510, China;
4. Qingdao West Coast New Area Water Affairs Development Center, Qingdao 266500, China)

Abstract: A wastewater treatment plant (WWTP) in Shandong Province has a treatment capacity of $6\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$, adopting the method of adding new wastewater treatment process units for the upgrading of class Ⅳ standard. The process adopts the technical route of BFM based on biofilm method and integrated activated carbon adsorption unit. The area occupied by the upgrading and reconstruction processing unit is $0.03\text{ m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$, and the filling rates of the aerobic and anaerobic zones in the BFM biological tank reached to 55% and 50%, respectively. During stable operation, the actual influent of BFM fluctuates greatly. Under the conditions of influent COD, $\text{NH}_3\text{-N}$, TN, TP, and SS being 16.72~37.34 mg/L, 0.22~4.19 mg/L, 9.70~14.15 mg/L, 0.03~0.42, and 6.79~9.54 mg/L, respectively, after BFM treatment, it can

基金项目: 青岛西海岸新区科技攻关“揭榜制”专项(2024-4)

通信作者: 吴迪 E-mail: hitwudi@126.com

be stably reduced to 16.59–21.89 mg/L, 0.03–0.13 mg/L, 7.15–9.04 mg/L, 0.02–0.10 mg/L, and 3.24–6.51 mg/L. High-throughput sequencing results showed that the biofilm achieved efficient enrichment of functional bacteria under low substrate conditions, with relative abundances of aerobic nitrifying bacteria and anaerobic denitrifying bacteria reaching 7.77% and 16.5%, respectively. The BFM process has the advantages of intensification, efficiency, and stability, which can serve as a reference for upgrading and reconstruction similar sewage treatment plants.

Key words: upgrading and reconstruction; biofilm; MBBR; advanced treatment

近年来,为持续改善水环境,我国污水厂排放标准不断提高,以满足治污需求。污水厂提标主要有2种思路:一种是在原生化池内解决脱氮问题,原位强化生化脱氮性能,增加或强化除磷深度处理;另一种是生化池不改造,脱氮除磷提升完全依赖深度处理。活性污泥系统投加悬浮载体形成泥膜复合MBBR(流化床生物膜反应器)工艺是生化原位强化的常规手段,具有处理效果稳定、运行维护简单及抗冲击性强等特点^[1]。深度处理同时强化氮磷去除以反硝化深床滤池为典型代表^[2],但其存在滤料易堵塞和反冲洗频繁、碳源投加量过大、脱氮除磷难以同时兼顾等问题,亟须解决或找到替代技术。流化床生物膜发明之初即为生物膜法,后因国内提标改造则用于活性污泥系统强化。近些年对纯膜MBBR不断进行研究和应用,揭示了其反硝化深床滤池的可行替代方案,并形成了生物集效工艺(Bio-Film & Magnetic, BFM)。

以山东某污水厂提标改造为例,分析了新建BFM工艺用于污水厂提标改造的可行性与运行效果,以期为同类型污水厂提标改造提供参考。

1 项目概况

1.1 项目简介

该污水厂始建于2005年,处理规模 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,核心生化工艺为百乐克,出水经絮凝沉淀+砂滤池+紫外消毒后达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准。根据《山东省城市排水“两个清零、一个提标”工作方案》,污水厂出水主要指标需执行《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅳ类标准,其中 $\text{TN} \leq 12 \text{ mg/L}$,因此需对污水厂进行提标改造。该污水厂现状进、出水水质见表1。当前运行各项指标均能够稳定达到一级A标准,但TN与地表水Ⅳ类标准仍有较大差距,COD、氨氮和TP的保证率也需提高。

表1 污水厂运行现状

Tab.1 Current operation status of the WWTP

项目	COD	BOD ₅	NH ₃ -N	TN	TP	SS
原设计进水/(mg·L ⁻¹)	460	280	40	52	3	380
原设计出水(一级A)/(mg·L ⁻¹)	50	10	5(8)	15	0.5	10
原实际出水/(mg·L ⁻¹)	17.51~39.9	<10	0.12~4.14	8.65~14.3	0.02~0.42	<10
拟提升标准(地表水Ⅳ类)/(mg·L ⁻¹)	30	10	1.5(3.0)	12	0.3	10
地表水Ⅳ类达标率/%	98.61	100	93.37	80.28	95.06	100

1.2 项目难点

受该污水厂原工艺运行以及运营模式的限制,无法进行原位改造,只能在后端新增污水处理工艺单元强化污染物去除,面临的难点包括:

① 用地紧缺

新建提标改造工程不能在原污水厂内实施,只能在其附近征地,可用地仅为 0.2 hm^2 (3亩),因此需要采用集约技术,在有限占地内完成工程项目的改造。

② 重点水质指标达标率低

该污水厂现阶段出水能够实现稳定的一级A达标,但核心指标与地表水Ⅳ类标准差距较大。受进水水质冲击、低温等环境因素的影响,氨氮Ⅳ类达标率不足94%,故应重点考虑硝化的稳定性以及抗低温性能;由于百乐克工艺缺氧环境难以控制,脱氮性能较弱,TN准Ⅳ类达标率仅为80.28%,此次提标改造需要重点考虑;BOD₅可以实现稳定的达标,但是COD仍存在不达标的情况,且根据现状COD波动与BOD₅的关联性,分析项目进水中存在部分难降解COD,因COD的准Ⅳ类达标率仍能达到98%以上,所以此次提标在考虑难降解COD的去除方面以应对冲击为主,COD并非主要因素。受原工

艺限制,除磷效果提升有限,化学除磷效率难以进一步提升。因此,深度处理工艺需同步考虑除磷问题。

③ 可借鉴案例较少

虽有较多通过新建反硝化深床滤池实现污水厂提标的案例,但一般只针对TN或TP的问题,重点指标单一;若同时兼顾TN和TP,则各自的去除量受限。该项目同时还要考虑氨氮和COD问题,相关案例较少。

综合以上分析,提标面临新建工艺用地紧缺、重点水质达标率低、可借鉴案例较少等难题,需采用高效集约型工艺。实质上该项目是在贫营养条件下解决C、N、P核心指标深度去除问题,其难度较常规的污水厂提标改造有所提高。BFM工艺装备的成熟应用为解决上述难题提供了思路。

2 技术路线选择

2.1 BFM 工艺

BFM是在传统泥膜复合MBBR工艺的基础上研发形成的一种连续流、集约型生物膜污水处理工艺。MBBR工艺虽在国内应用较早,但主要以泥膜复合形式存在,悬浮载体的投加旨在弥补活性污泥性能的不足,以辅助功能为主^[1]。而经过工程研究发现,生物膜法具备更加高效稳定的处理性能,在处理负荷、抗冲击能力等方面远优于活性污泥法,这推动了纯膜MBBR工艺的应用^[3-4]。在此基础上通过耦合固液分离工艺形成的BFM工艺成为具备脱氮除磷的关键核心工艺系统^[5]。截至2023年,累计处理污水量近400×10⁴ m³/d,广泛应用于市政污水、工业废水等各类污(废)水的处理。典型应用案例如表2所示。

表2 BFM工艺应用情况
Tab.2 Application of BFM process

项目	难点问题	出水水质	填充率/%	悬浮载体类型	缺氧搅拌器类型	参考文献
山东A	进水氨氮高达950 mg/L	优于一级A标准	好氧区>50	好氧区专用		[6]
山东B	缺地、工业废水冲击	优于地表水准Ⅳ类标准	好氧区>65, 缺氧区>55	好氧区专用,缺氧区 专用	悬浮载体专用搅拌器 (SPR型)	[7]
山东C	控制TN<5 mg/L	优于地表水准Ⅳ类标准	好氧区>60, 缺氧区>55	好氧区专用,缺氧区 专用	悬浮载体专用搅拌器 (SPR型)	[8]
广东A	应急、缺地	优于地表水准Ⅳ类标准	好氧区>50	好氧区专用		[9]
广东B	水质水量冲击大、投资 受限	氨氮<0.5 mg/L	好氧区>50	好氧区专用		[10]

山东A项目(制药废水处理厂)采用BFM工艺进行扩容提标改造,以生物膜法替代活性污泥法,实现了生化池原池4倍处理性能的提升,稳定运行期间在面对进水pH、二氯甲烷及进水负荷冲击的情况下,生物膜系统受影响程度小且恢复能力强,具备较强的抗冲击负荷能力。山东B项目(市政+工业污水厂)采用BFM工艺新建,吨水占地仅为0.215 m²/(m³·d⁻¹),较活性污泥系统节约74%的占地,在工业废水的冲击下,实现地表水准Ⅳ类标准集约高效稳定运行。山东C项目(市政污水厂)采用BFM工艺保障出水NH₃-N、TN、TP分别低至0.5、5、0.1 mg/L,实现了市政污水的高效脱氮除磷,去除效果稳定,也为该项目在低基质条件下的稳定运行奠定了基础。广东A项目(市政污水厂)采用BFM工艺新建污水处理设施1套,处理水量为3×10⁴ m³/d,生化段停留时间仅为1.99 h,采用装配式建设,仅30 d完成

新建,BFM工艺出水COD、NH₃-N、TP及SS指标分别降至13.07、1.47、0.26、2.83 mg/L,处理效果稳定。广东B项目(水质净化厂)实际进水COD、BOD₅、NH₃-N、TP分别低于30、8、3、0.3 mg/L,与该项目实际进水水质极为类似。采用BFM工艺进行改造,投加新悬浮载体,在冬季最不利条件下运行5 d后完成载体的自然挂膜,运行10 d后实现出水氨氮低于0.5 mg/L。稳定运行期间,在长期超负荷运行下依然能够稳定实现氨氮低于0.5 mg/L的目标,体现了BFM工艺较强的抗负荷冲击能力。在低基质培养条件下,高通量测序结果显示生物膜中*Nitrospira*和*Nitrosomonas*相对丰度分别可达13.60%和5.64%,实现了低基质硝化菌的高效富集,有效保障了宏观效果的稳定性。

以上实践表明,BFM工艺脱氮除磷效果显著,不仅能够通过高效的处理性能降低土地占用,而且

通过核心生物膜的方式强化微生物的富集能力,有助于宏观效果的良好发挥,具有广泛的适应性。

2.2 工艺路线对比

综合考虑该项目脱氮除磷的控制需求,对比BFM和CN+DN(硝化+反硝化滤池)两条工艺路线,实质上是流化床生物膜和固定床生物膜两条工艺路线的对比,如图1所示。

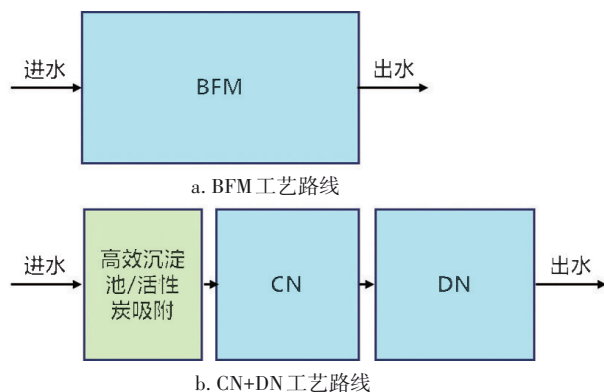


图1 BFM与“CN+DN”工艺路线对比

Fig.1 Comparison between BFM and “CN+DN” process

针对低基质污水脱氮,生物膜法是主流工艺,而流化床生物膜通过载体流化设计避免了固定床生物膜的反冲洗操作,保障了微生物富集的高效性与稳定性;针对除磷,BFM工艺已集成强化固液分离工艺,可实现TP低于0.05 mg/L的目标。而“CN+DN”工艺如考虑自身除磷,则滤池应以低负荷设计,此时占地面积预计达到0.27 hm²(4.0亩),现有用地难以完成新建,因此需要在滤池前端增设高效沉淀池,以保障TP达标。针对难降解COD的去除,该项目以应对冲击为主,而非长期运行保障,故采用活性炭吸附工艺,以提高脱碳的灵活性并降低投资,活性炭吸附工艺均集成于固液分离单元,不单独新建。

综合考虑用地指标以及工艺运行稳定的要求,该项目最终采用BFM工艺实施新建。

3 工艺设计

3.1 新建工艺设计

新建项目设计规模为6×10⁴ m³/d,设计进、出水水质如表3所示。改造后污水厂工艺流程如图2所示。新建项目进水来自原污水厂絮凝沉淀池出水,之后进入BFM工艺单元,通过BFM耦合活性炭吸附实现C、N、P核心指标的去除,出水满足地表水Ⅳ类标准。

表3 新建项目设计进、出水水质

Tab.3 Design influent and effluent quality for the new project

项目	COD	BOD ₅	NH ₃ -N	TN	TP	SS
系统进水水质	460	280	40	52	3	380
污水厂出水水质	50	10	8	15	0.5	10
BFM设计出水水质	30	10	1.5(3.0)	12	0.3	10

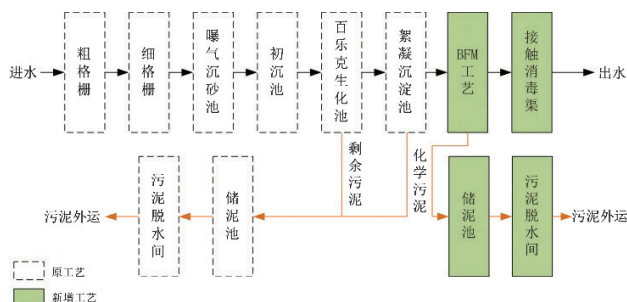


图2 工艺流程

Fig.2 Process flow of the project

3.2 BFM工艺设计

BFM工艺依次设计好氧1区、缺氧区、好氧2区和固液分离区。整体占地约0.18 hm²(2.68亩),吨水占地0.03 m²/(m³·d⁻¹)。好氧1区、缺氧区、好氧2区均投加SPR-Ⅲ型悬浮载体,比表面积为800 m²/m³,好氧区悬浮载体填充率55%,缺氧区悬浮载体填充率50%,总停留时间3.6 h。好氧区通过风机和曝气系统提供氧气,采用空气悬浮鼓风机,共设3台(2用1备),Q=30 m³/min,P=73.5 kPa,N=56.25 kW,曝气系统采用穿孔管。缺氧区设悬浮载体专用搅拌器(SPR型)1台,N=77 kW,配备碳源计量泵6台(4用2备),Q=100 L/h,H=300 kPa,N=0.37 kW。超效分离设计表面负荷14.2 m³/(m²·h),配专用搅拌、沉淀设备1套,混合池、加载池、絮凝池停留时间均为2.5 min。活性炭吸附池位于好氧2区之后,设计HRT为0.5 h,配专用搅拌器和活性炭投加装置各1套。

3.3 其他辅助设计

① 储泥池

新建储泥池1座,分2组,每组平面净空尺寸6.3 m×2.0 m,水深2.4 m。储泥池内设潜水搅拌机4台(2用2备),N=3.0 kW;排泥泵4台,Q=80 m³/h,H=250 kPa,N=11 kW。

② 污泥脱水间

新建污泥脱水机房,设计进泥含水率<99.2%,出泥含水率<80%,污泥湿重187.5 m³/d,污泥干质量1500 kg/d。设2台叠螺脱水机,处理能力100~

140 kgDS/h, $N=1.5$ kW, 每天工作时间 12 h。另外, 配套污泥螺杆泵 2 台, $Q=150$ m³/h, $H=300$ kPa, $N=7.5$ kW; PAM 全自动絮凝药液制备装置 1 套, $N=4.0$ kW; PAM 加药泵 2 台(1 用 1 备), $Q=1.5$ m³/h, $H=300$ kPa, $N=1.5$ kW; 水平螺旋输送机 1 套, $N=2.2$ kW; 倾斜螺旋输送机 1 套, $N=3.0$ kW。

③ 接触消毒池

采用钢筋混凝土结构, 尺寸($L \times W \times H$)为 33.0 m $\times$ 22.5 m $\times$ 4.5 m, 停留时间 30 min。配备次氯酸钠储药罐 2 台, 有效容积 30 m³, 次氯酸钠投加量为 10 mg/L, 以及机械隔膜加药泵 2 台(1 用 1 备), Q 为 0~2 000 L/h, $P=0.4$ MPa, $N=0.75$ kW。

④ 巴氏计量槽

采用钢筋混凝土结构, 平面尺寸($L \times W \times H$)为 24.5 m $\times$ 2.2 m $\times$ 1.7 m, Q 为 35~2 000 L/s。

4 实施效果

该污水厂提标改造工程于 2022 年顺利完工, 改造后平面布置如图 3 所示。

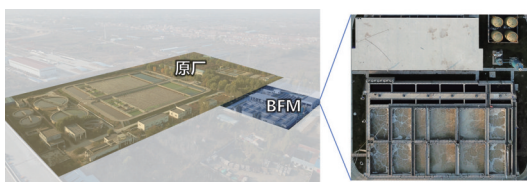
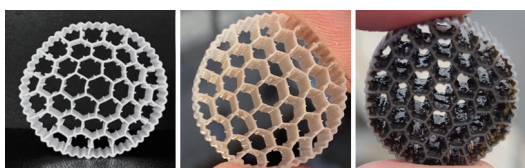


图3 项目平面布置

Fig.3 Layout plan of the project

BFM 生物池悬浮载体挂膜效果如图 4 所示。



a. 新载体 b. 运行一周 c. 稳定期

图4 BFM 生物池悬浮载体挂膜

Fig.4 Photos of BFM biological pool suspended carrier film hanging

BFM 生物池投加新悬浮载体, 启动初期加入部分原水促进挂膜, 启动一周后悬浮载体即有淡黄色生物膜附着, 进入稳定运行阶段后, 悬浮载体生物膜整体呈现棕色。2023 年, BFM 生物池进水 COD、NH₃-N、TN、TP、SS 分别为 16.72~37.34、0.22~4.19、9.70~14.15、0.03~0.42、6.79~9.54 mg/L, 波动较大, 经 BFM 工艺处理后分别降至 16.59~21.89、0.03~0.13、7.15~9.04、0.02~0.10、3.24~6.51 mg/L,

稳定达到设计标准。运行期间, 经生物膜处理后出水 COD 即稳定低于 30 mg/L, 因此未投加粉末活性炭。BFM 生物池悬浮载体好氧区生物膜硝化菌和缺氧区反硝化菌的相对丰度分别达到 7.77% 和 16.50%。北方某市政污水厂采用 BFM 工艺, 其生物膜硝化菌和反硝化菌的相对丰度分别为 4.15%~9.19%、10.85%~16.52%^[11]。该项目在低基质进水条件下, 微生物的富集能力已达到市政污水的水平, 体现了生物膜在低基质、贫营养水中对功能菌的高效富集能力, 为达到宏观效果提供了微观保障。

5 结论

山东某污水厂采用新建 BFM 工艺的方式实现了地表水准Ⅳ类提标改造。新建工艺吨水占地仅 0.03 m²/(m³·d⁻¹), 在进水水质波动较大的情况下, 实现了出水水质稳定达标, 出水 COD、NH₃-N、TN、TP、SS 分别降至 16.59~21.89、0.03~0.13、7.15~9.04、0.02~0.10、3.24~6.51 mg/L。该项目通过 BFM 工艺成功解决了用地紧缺、重点水质指标达标率低等难题, 实现了污水的高效、稳定处理, 为类似污水厂提标改造提供了新思路。悬浮载体生物膜在低进水负荷条件下实现了功能菌的高效富集, 丰富了 BFM 工艺的应用场景。

参考文献:

- [1] 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).
- [2] 马丽芳, 陈菊香, 孙锐. 克拉玛依市某污水处理厂一级 A 提标改造工程实例[J]. 中国给水排水, 2020, 36(18): 122-125.
MA Lifang, CHEN Juxiang, SUN Rui. A WWTP upgrading reconstruction project to meet the first level A discharge standard in Karamay [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(18): 122-125 (in Chinese).
- [3] 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).
- [4] 刘强,王泰,沈淳,等. MBBR工艺用于污水厂提标改造的低温运行效果[J]. 中国给水排水, 2020, 36 (13): 7-13.
- LIU Qiang, WANG Tai, SHEN Bo, *et al.* Operation effect of MBBR applied in upgrading and reconstruction of a wastewater treatment plant in Tianjin at low temperature[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36 (13): 7-13 (in Chinese).
- [5] 周家中,韩文杰,吴迪,等. MBBR工艺应用于市政污水处理的系列解决方案探讨[J]. 中国给水排水, 2023, 39(12): 1-12.
- ZHOU Jiazhong, HAN Wenjie, WU Di, *et al.* Discussion on series solutions of MBBR process applied to municipal sewage treatment [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(12): 1-12 (in Chinese).
- [6] 肖宁,唐国卿,周家中,等. 纯膜MBBR+A/O双泥系统用于制药废水脱氮工程[J]. 中国给水排水, 2022, 38 (14): 93-98.
- XIAO Ning, TANG Guoqing, ZHOU Jiazhong, *et al.* Application of pure MBBR and A/O double sludge system in pharmaceutical wastewater denitrification project [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38 (14): 93-98 (in Chinese).
- [7] 周家中,韩文杰,宋平周,等. 华北某集约型污水厂BFM工艺设计与运行分析[J]. 中国给水排水, 2023, 39(18): 126-132.
- ZHOU Jiazhong, HAN Wenjie, SONG Pingzhou, *et al.* BFM process design and operation analysis of an intensive WWTP in North China [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(18): 126-132 (in Chinese).
- [8] 高彦博,杨忠启,周家中,等. BFM装配式用于占地受限型污水处理工程设计[J]. 中国给水排水, 2023, 39 (2): 46-51.
- GAO Yanbo, YANG Zhongqi, ZHOU Jiazhong, *et al.* Application of BFM fabricated structure in the design of land limited wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39 (2): 46-51 (in Chinese).
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] 韩文杰,徐康康,杨忠启,等. 多级多段纯膜MBBR工艺的脱氮稳定性与微生物菌落结构分析[J]. 环境工程学报, 2023, 17(9): 3066-3078.
- HAN Wenjie, XU Kangkang, YANG Zhongqi, *et al.* Analysis of denitrification stability and microbial structure in multi-stage pure MBBR process [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(9): 3066-3078 (in Chinese).

作者简介:王玉敏(1970—),男,山东昌乐人,学士,高级工程师,主要从事污水厂建设、管理等工作。

E-mail: 15864597828@163.com

收稿日期: 2024-01-15

修回日期: 2024-08-08

(编辑:衣春敏)

用生命之水

筑美丽中国