

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.11.015

基于泥膜耦合的强化生物技术处理城镇污水中试

张丽丽^{1,2}, 郭红峰², 严国奇², 陈维航², 单依雯², 张欣²,
李咏梅¹

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 杭州市水务集团有限公司, 浙江杭州 310009)

摘要: 针对城镇污水处理厂提标改造出水水质要求高、无新增用地等难点,采用3种基于泥膜耦合的强化生物处理工艺,以实际城镇污水为处理对象进行中试研究。3种工艺分别是以芽孢杆菌为优势菌的生物反应器(BBR工艺)、高浓度复合粉末载体生物流化床(HPB工艺)和移动床生物膜反应器(MBBR工艺)。与厂区出水水质进行同步比较,结果表明,3种工艺出水TN平均浓度比厂区二沉池出水降低39%~57%,在不投加药剂情况下出水TP浓度与厂区投加药剂情况下相当。3种强化生物处理工艺经驯化后,污泥中菌群多样性低于厂区活性污泥,门水平上富集的微生物菌群主要为变形菌门(*Proteobacteria*)和厚壁菌门(*Firmicutes*),属水平上富集的聚磷菌和兼性厌氧菌平均相对丰度比厂区活性污泥分别提高了0.94%和29.76%,强化了脱氮除磷效果。

关键词: 泥膜耦合强化生物技术; 城镇污水; 脱氮除磷; 微生物群落

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)11-0104-06

Pilot Study on Enhanced Biotechnology for Municipal Wastewater Treatment Based on Sludge-Biofilm Coupling

ZHANG Li-li^{1,2}, GUO Hong-feng², YAN Guo-qi², CHEN Wei-hang², SHAN Yi-wen²,
ZHANG Xin², LI Yong-mei¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Hangzhou Water Group Co. Ltd., Hangzhou 310009, China)

Abstract: In response to the challenges of stringent effluent quality requirements and the lack of available land for upgrading wastewater treatment plants (WWTPs), three enhanced biological treatment processes based on sludge-biofilm coupling were selected for pilot-scale studies using actual municipal wastewater treatment scenarios. These processes included the biological reactor with *Bacillus* as the dominant bacteria (BBR process), the high-concentration composite powdered carrier biological fluidized bed (HPB process), and the moving bed biofilm reactor (MBBR process). The average total nitrogen (TN) in the effluent from the three processes was 39% to 57% lower compared to that in the effluent from secondary sedimentation tank of the WWTP. Additionally, the total phosphorus (TP) in the effluent without chemicals addition was comparable to that of the effluent from the WWTP with chemicals addition. After the acclimation of the three enhanced biological processes, the microbial diversity in the

基金项目: 上海市科委国际合作项目(23230714100); 浙江省建设科研项目(2022K155)

通信作者: 李咏梅 E-mail: liyongmei@tongji.edu.cn

sludge was found to be lower than that in the activated sludge of the WWTP. At the phylum level, the enriched microbial communities were predominantly composed of *Proteobacteria* and *Firmicutes*. At the genus level, the average relative abundance of phosphate-accumulating bacteria and facultative anaerobic bacteria increased by 0.94% and 29.76%, respectively, compared to the activated sludge in the WWTP. These changes contributed to an enhanced nitrogen and phosphorus removal efficiency.

Key words: enhanced biotechnology based on sludge-biofilm coupling; municipal wastewater; nitrogen and phosphorus removal; microbial community

随着我国各地不断提出“准Ⅳ类水”排放标准,对城镇污水处理厂的出水水质提出了更高的要求,同时在“碳达峰、碳中和”目标下,降低污水处理的能耗、药耗,减少碳排放是污水处理行业升级改造的迫切需求。目前,我国大部分污水处理厂提标改造依赖于延长处理流程,增加三级处理,或者增大碳源和化学除磷药剂的投加量^[1]。提标改造工程大多面临无新建用地的问题,所以利用生化池原池进行改造、深度挖潜生化工艺处理效能成为提标改造的重点和难点。越来越多的研究致力于通过泥膜耦合工艺强化生物处理,活性污泥耦合生物膜不仅能增加污泥浓度,还能形成“双泥龄”,克服脱氮除磷矛盾,进一步强化生物脱氮除磷效率^[2]。常见的强化生物技术包括移动床生物膜反应器(MBBR)^[3]、高浓度复合粉末载体生物流化床(HPB)^[2]、以芽孢杆菌为优势菌的生物反应器工艺(BBR)^[4]、生物固定膜工艺(HBF)^[5]等。笔者采用BBR、HPB、MBBR三种泥膜耦合工艺对生物处理段进行强化,并通过处理实际污水的中试研究各泥膜耦合工艺对出水水质、运行稳定性的影响,分析各工艺的作用原理,旨在为污水处理厂提标改造工艺选择提供参考。

1 材料与方法

1.1 污水厂概况

中试在杭州某污水处理厂开展,该厂设计处理规模为 $60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,采用AAO+反硝化深床滤池工艺,出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准。中试进水采用厂区某组生化池进水,并将中试出水与该组生化池对应的二沉池出水进行对比。

1.2 中试装置

BBR、HPB和MBBR工艺的中试流程如图1所示。BBR工艺在AAO厌氧段设置生物转盘(未挂膜),接种厂区生化池的活性污泥挂膜培养9 d,其间

采用芽孢杆菌接种,初始投加芽孢杆菌粉末 $0.76 \text{ kg}/\text{m}^3$,进水量为 $2 \sim 4 \text{ m}^3/\text{d}$,投加营养液 $1.25 \text{ mL}/\text{m}^3$;然后以 $4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的进水量稳定运行30 d;之后开始与厂区以及另外两种工艺中试系统进行同步对比,其间投加营养液 $0.06 \text{ mL}/\text{m}^3$ 。

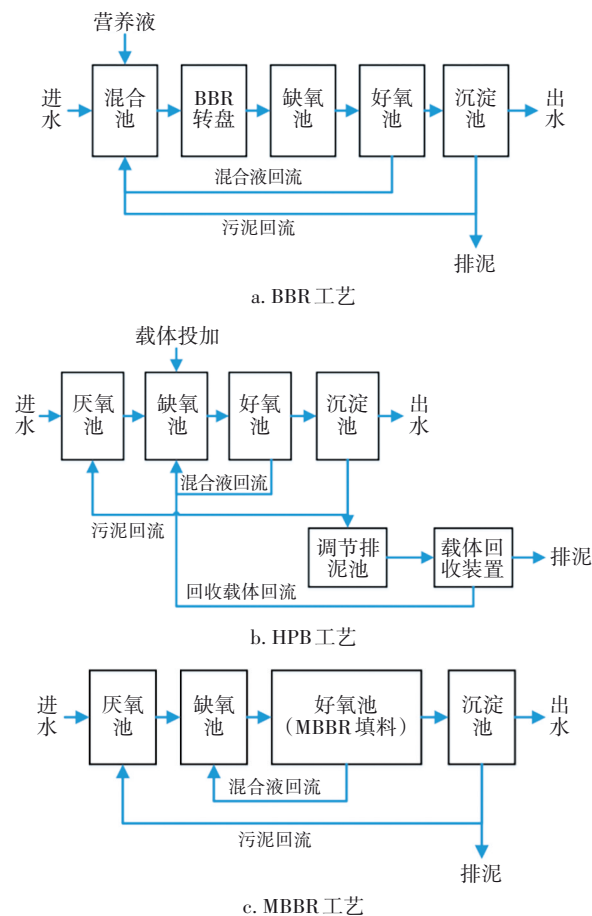


图1 3个中试装置的工艺流程

Fig.1 Process flow of three pilot plants

HPB工艺在生化池投加复合粉末载体,并在二沉池剩余污泥排放管路上增加载体回收装置,接种厂区生化池的活性污泥培养7 d,复合粉末载体初始投加量约为 $5.5 \text{ g}/\text{L}$,然后开始与厂区以及另外两种

工艺中试系统进行同步对比,连续运行期间复合粉末载体投加量为10 mg/L。

MBBR工艺在生化池好氧段投加悬浮生物膜填料(已挂膜),填料比表面积约为800 m²/m³,好氧段填充率约为30%,接种厂区活性污泥后培养12 d,然后开始与厂区以及另外两种工艺中试系统进行同步对比。3个中试系统进行同步对比之前,出水水质均达到COD<30 mg/L、氨氮<1 mg/L、TN<12 mg/L、TP<0.5 mg/L。

1.3 进水水质与运行参数

中试进水采用污水厂生化池进水,试验期间的水质见表1,进水COD/TN均值为5.53、COD/TP均值为51.18、B/C值为0.3~0.5;为了量化水质波动程度,计算各指标的变异系数(标准差与算术平均值的比值),结果均低于0.25,表明进水水质较稳定。

表1 试验期间生化池进水水质

Tab.1 Influent quality of biological reaction tank during the test mg·L⁻¹

项目	COD	NH ₃ -N	TN	TP
最大值	365.8	38.9	46.5	6.7
最小值	96.4	14.1	21.5	2.6
平均值	195.5	26.1	35.1	3.9
标准差	49.4	5.5	5.2	0.8

试验出水水质的目标为地表准Ⅳ类标准,即COD≤30 mg/L、NH₃-N≤1.5 mg/L、TN≤12 mg/L、TP≤0.3 mg/L,各工艺的中试装置生化段设计运行参数与厂区基本保持一致,具体见表2。对于除磷药剂,中试装置未投加,厂区在二沉池进水处投加。

表2 各中试装置及厂区的运行参数

Tab.2 Operating parameters of pilot plants and the WWTP

项目	BBR 工艺	HPB 工艺	MBBR 工艺	厂区AAO 工艺
进水流量/(m ³ ·d ⁻¹)	4.0	4.8	43.2	10×10 ⁴
生化池容积/m ³	2.485	2.842	29	66 058
总HRT/h	14.91	14.21	16.12	14.03
厌氧、缺氧、好氧 HRT/h	1.54、 4.09、9.27	1.42、 5.68、7.11	1.32、 6.92、7.88	1.20、 6.15、6.68
内回流比/%	180	200	200	200
污泥回流比/%	80	100	200	100
生化池MLSS/(g·L ⁻¹)	5.0±0.5	11.6±1.5	9.9±3.1	6.2±0.5
生化池MLVSS/(g·L ⁻¹)	2.6±0.3	5.3±0.7	4.7±1.3	3.2±0.3
好氧末端DO/(mg·L ⁻¹)	2.15±0.17	2.25±0.15	2.19±0.87	3.69±1.35
污泥龄/d	28±3	11±2	13±4	26±2

1.4 检测项目与方法

COD、NH₃-N、TN、TP、MLSS、MLVSS等指标均采用国家标准方法进行检测;DO、pH和水温均采用便携式仪表进行检测;活性污泥的硝化速率和反硝化速率采用批次试验进行测定;另外,采用高通量测序技术对活性污泥的16S rRNA基因进行扩增和测序分析。

2 结果与讨论

2.1 出水水质分析

各工艺中试装置稳定运行后,与厂区同步运行约1个月,试验期间进水温度为(18.7±0.9)℃,出水水质情况见表3。

表3 各中试装置及厂区的出水水质

Tab.3 Effluent quality of pilot plants and the WWTP mg·L⁻¹

项目	出水COD				出水氨氮			
	BBR	HPB	MBBR	厂区	BBR	HPB	MBBR	厂区
最大值	24.00	24.00	27.00	27.00	0.30	0.50	1.85	3.00
最小值	10.00	7.00	10.00	5.00	0.08	0.07	0.06	0.06
平均值	16.71	15.80	18.00	16.57	0.15	0.16	0.44	0.67
标准差	3.87	5.07	5.72	7.71	0.08	0.11	0.55	0.91
项目	出水总氮				出水总磷			
	BBR	HPB	MBBR	厂区	BBR	HPB	MBBR	厂区
最大值	5.00	5.80	8.80	10.70	0.42	0.26	1.02	0.37
最小值	1.90	2.20	2.90	4.20	0.10	0.11	0.13	0.11
平均值	3.06	3.81	4.34	7.07	0.23	0.18	0.38	0.24
标准差	0.86	1.15	1.75	2.05	0.12	0.05	0.27	0.08

2.1.1 出水COD浓度

由表3可知,3种工艺中试出水和厂区二沉池出水的COD浓度平均值在15~18 mg/L之间,最大值均低于30 mg/L,表明3种工艺中试出水与厂区二沉池出水的COD浓度基本一致,出水COD浓度变异系数依次为0.23、0.32、0.32、0.47,出水COD均较为稳定,由于进水主要为生活污水,进水中的不可降解有机物含量较少,经过生物处理后出水COD浓度较低。

2.1.2 出水总磷浓度

3种工艺中试装置在不投加除磷药剂的情况下出水总磷平均浓度和厂区二沉池出水相差不大,厂区在二沉池之前投加化学除磷药剂。3种工艺中试装置在不投加除磷药剂的情况下出水总磷浓度较低,一方面可能与微生物组成有关,另一方面,HPB工艺和MBBR工艺出水总磷浓度低与污泥龄控制较

短有关。

从微生物组成来看,侯继燕等人^[4]分析了BBR工艺除磷的技术特点,由于BBR工艺富集了革兰氏阳性菌,该菌在生长过程中会吸收大量的磷,使得除磷效果提升,革兰氏阳性菌的细胞壁含有大量的磷壁酸,而革兰氏阴性菌中不含磷壁酸,因此革兰氏阳性菌的含磷量比革兰氏阴性菌高很多,厚壁菌门和变形菌门就是两类典型的革兰氏阳性菌。柴晓利等人^[2]研究发现,通过复合粉末载体的投加及排泥过程中载体和附着微生物的回收循环,实现了“双泥龄”,克服了脱氮菌和除磷菌的污泥龄矛盾,有利于生物除磷。赵一宁等人^[6]研究发现,MBBR悬浮填料在生化池互相碰撞,生物膜不断脱落、更新,使内部缺氧区、厌氧区成为表层好氧区,满足聚磷菌厌氧释磷、好氧吸磷的条件。在本研究中,微生物菌群检测结果显示,3个中试装置污泥在门水平上厚壁菌门的相对丰度明显增加,在属水平上聚磷菌的相对丰度明显增加。

2.1.3 出水氨氮浓度

由表3可知,3个中试及厂区出水氨氮平均值均低于1 mg/L,MBBR中试与厂区出水氨氮平均浓度略高于BBR中试和HPB中试,且前两者的出水氨氮浓度变异系数(1.26、1.36)也高于后两者(0.54、0.70),主要由于MBBR中试和厂区处理规模较大,运行过程中DO控制稳定性比BBR中试和HPB中试要差,根据表2可知,BBR、HPB、MBBR中试及厂区生化池DO浓度的变异系数分别为0.08、0.06、0.40和0.38。氨氮的去除效果主要与进水碱度、pH、温度、污泥有机负荷、DO、微生物菌群等因素有关。赵一宁等人^[6]研究发现,当DO为1.5 mg/L时,MBBR工艺对氨氮的平均去除率为76.12%,当DO升至3 mg/L时,氨氮的平均去除率提高至94.85%,表明DO对氨氮去除的影响较大。

测定得到BBR、HPB、MBBR中试和厂区活性污泥的比硝化速率分别为2.40、1.40、1.33和2.44 mg/(gMLVSS·h),考虑到各生化池污泥浓度有一定差别,采用表2中的平均污泥浓度,计算得到各中试及厂区活性污泥单位容积氨氮降解速率分别为6.24、7.42、6.25和7.81 mg/(L·h),由于检测过程中只测定了悬浮污泥,BBR和MBBR中试未包括生物膜上的生物量。郑敏等人^[7]研究发现,MBBR工艺的比硝化速率为2.76 mg/(gMLVSS·h),与不投加

填料的活性污泥相比提高了25.5%,表明填料的投加对氨氮的去除具有强化效果。但由于运行期间水质和水量较稳定,泥膜耦合工艺中试与厂区相比未体现出明显优势。

水温对氨氮的去除效果影响较大,郑敏等人^[7]研究发现,当水温从5℃升至35℃时,比氨氮氧化速率增大了1.93倍,当水温低于10℃时,硝化反应活性大大降低。试验期间进水温度为(18.7±0.9)℃,水温较为适宜,对于在最不利水温条件下3种泥膜耦合工艺的性能还需进一步研究,但随着大多数污水厂采用加盖除臭或地埋式建设形式,污水厂冬季最低水温有所提高,以开展试验的污水厂为例,冬季12月和1月平均水温约为15℃,全年低于15℃的天数仅15 d。

2.1.4 出水总氮浓度

由表3可知,BBR、HPB和MBBR中试系统出水总氮平均浓度均低于厂区二沉池出水,分别降低了57%、46%和39%,且出水总氮的变异系数(依次为0.28、0.30、0.40)与厂区的(0.29)相差不大,表明3种泥膜耦合工艺均有利于总氮的去除。另外测得,3个中试装置污泥的反硝化速率均高于厂区污泥,BBR、HPB、MBBR和厂区污泥的比反硝化速率分别为5.49、3.95、3.97和3.20 mg/(gMLVSS·h),采用表2中的平均污泥浓度计算各中试及厂区污泥的单位容积硝酸盐氮降解速率,结果分别为14.27、20.94、18.66、10.24 mg/(L·h),3个中试装置的活性污泥单位容积硝酸盐氮降解速率均高于厂区,且BBR和MBBR中试未包括生物膜上的生物量。这主要是由于3个中试装置均采用泥膜耦合工艺,通过投加填料优化了微生物群落结构,在填料表面附着了生物膜,随着生物膜由外到内溶解氧的逐渐减少,构建了局部缺氧微环境,促进了同步硝化反硝化反应,也有利于碳源的合理分配与利用,从而提升了总氮的去除效果^[2,4]。

2.2 微生物菌群分析

各中试装置稳定运行一段时间后,对生化池活性污泥进行16S rRNA扩增测序分析,污泥的多样性指数、OTUs和测序深度统计结果如表4所示。可以看出,污泥样品总体测序深度较好,Coverage值均在0.99以上。从Shannon指数和Chao1指数来看,厂区生化池活性污泥的微生物群落多样性高于3个中试装置。

表4 污泥样品测序信息及多样性指数
Tab.4 Sequencing information and diversity index
of sludge samples

项目	OTUs	Shannon	Chao1	Coverage
BBR中试	1 211	6.59	1 408.54	0.991
HPB中试	1 243	6.74	1 362.67	0.992
MBBR中试	1 345	7.33	1 521.41	0.991
厂区生化池	1 501	8.26	1 647.29	0.990

4个污泥样品中微生物菌群在门水平上的相对丰度见图2。厂区活性污泥样品中占比较高的菌门有变形菌门(*Proteobacteria*, 31%)、硝化螺旋菌门(*Nitrospirae*, 13%)、拟杆菌门(*Bacteroidetes*, 10%)、绿弯菌门(*Chloroflexi*, 16%)等, 3个中试污泥样品中占比最高的菌门为变形菌门(*Proteobacteria*)和厚壁菌门(*Firmicutes*), 两个菌门的总占比超过了70%。变形菌门是城镇污水处理厂活性污泥系统和废水生物处理系统中的主要菌群, 具有降解有机物和脱氮除磷的功能^[8]; 厚壁菌门主要为厌氧菌^[9], 同时也是革兰氏阳性菌。

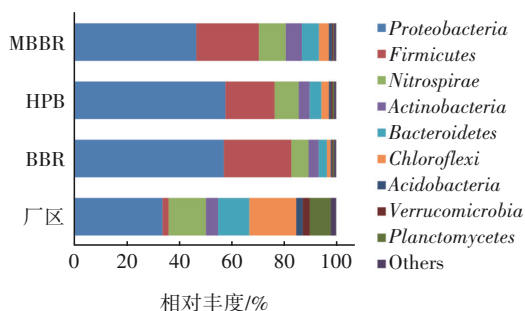


图2 不同污泥样品在门水平上的微生物群落结构
Fig.2 Microbial community structure of different sludge samples at phylum level

4个污泥样品中主要功能菌在属水平上的相对丰度变化如图3所示。硝化螺旋菌属(*Nitrospira*)是一种典型的硝化细菌, 可将亚硝酸盐氧化成硝酸盐^[10], 该菌在各中试及厂区污泥中的占比均较高。*Candidatus_Accumulibacter*和*Tetrasphaera*为常见的聚磷菌, 与厂区活性污泥相比, BBR、HPB和MBBR中试系统污泥中聚磷菌的相对丰度均有所提高, 从1.28%分别提高到了2.00%、1.63%和3.04%。*Dechloromonas*^[11]、*Enterobacter*、*Escherichia-Shigella*^[12]、*Clostridium*^[13]、*Lactobacillus*^[14]均为兼性厌氧菌, 能进行水解酸化、发生反硝化反应, 与厂区活性污泥相比, BBR、HPB和MBBR中试污泥中厌氧菌的相对丰度从6.04%分别提高至45.20%、37.49%和

24.70%, 反硝化菌的相对丰度提高明显, 这与泥膜耦合工艺原理相一致。

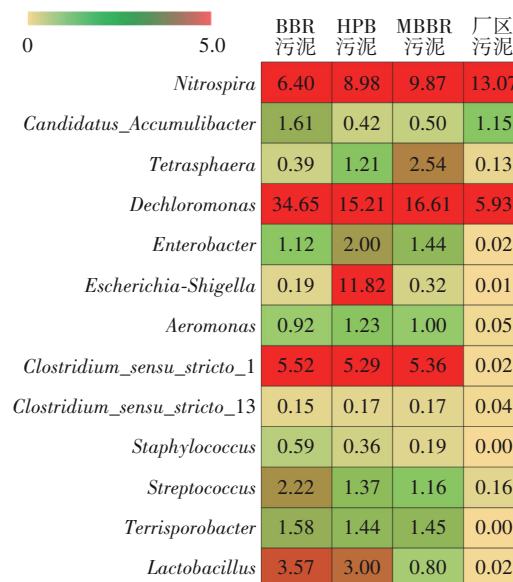


图3 属水平上主要功能菌的相对丰度

Fig.3 Relative abundance of functional bacteria at genus level

3 结论

① 3种泥膜耦合工艺中试装置运行稳定后, 出水COD、氨氮、总氮、总磷平均浓度分别低于20、1、5和0.4 mg/L。

② 3种泥膜耦合工艺均结合了活性污泥与生物膜的优势, 对总氮和总磷的去除效果有较大提高, 出水总磷浓度在不投加药剂情况下与厂区投加药剂条件下相差不大, 出水总氮平均浓度相比厂区二沉池出水降低了39%~57%。

③ 3种泥膜耦合工艺中的微生物菌群多样性低于厂区, 优化了微生物群落结构, 在门水平上富集的微生物菌群主要为变形菌门(*Proteobacteria*)和厚壁菌门(*Firmicutes*), 在属水平上聚磷菌的平均相对丰度比厂区活性污泥提高0.94%, 兼性厌氧菌平均相对丰度比厂区活性污泥提高29.76%。

参考文献:

- [1] ZHANG J B, SHAO Y T, WANG H C, et al. Current operation state of wastewater treatment plants in urban China [J]. Environmental Research, 2021, 195: 110843.
- [2] 柴晓利, 韩红波, 张宏亮, 等. HPB工艺用于污水厂提标扩容改造的生产性试验研究[J]. 中国给水排

- 水, 2021, 37(1): 9-15.
- CHAI Xiaoli, HAN Hongbo, ZHANG Hongliang, *et al.* Full-scale test of HPB process applied in upgrading and capacity expansion of a wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(1): 9-15 (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 Jiazong, 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] 侯继燕, 贾韬. BBR 工艺在岷沱江流域污水处理厂提标改造的应用案例[J]. *给水排水*, 2021, 47(S2): 105-107.
- HOU Jiyang, JIA Tao. Application case of BBR process in upgrading and upgrading of sewage treatment plant in Mintuo River basin [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 47(S2): 105-107 (in Chinese).
- [5] 王文标. 填料对 HBF 工艺处理生活污水的影响及其机制[J]. *净水技术*, 2018, 37(8): 16-24.
- WANG Wenbiao. Effect and mechanism of filler on domestic sewage treatment performance by HBF process [J]. *Water Purification Technology*, 2018, 37(8): 16-24 (in Chinese).
- [6] 赵一宁, 汤兵, 张忠华, 等. 利用悬浮填料附着生物膜同步去除碳氮磷[J]. *环境工程学报*, 2012, 6(12): 4553-4558.
- ZHAO Yining, TANG Bing, ZHANG Zhonghua, *et al.* Simultaneous carbon nitrogen and phosphorus removal by adherent biofilm on suspension packing [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(12): 4553-4558 (in Chinese).
- [7] 郑敏, 杨波, 汪诚文, 等. 中试 MBBR 装置强化氨氮去除速率的影响条件研究[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(10): 1778-1883.
- ZHENG Min, YANG Bo, WANG Chengwen, *et al.* Enhanced ammonia removal rate in a pilot-scale MBBR [J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(10): 1778-1883 (in Chinese).
- [8] MENG J, LI J L, LI J Z, *et al.* Effect of seed sludge on nitrogen removal in a novel upflow microaerobic sludge reactor for treating piggery wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 216: 19-27.
- [9] 韩红波, 王成显, 牟悦, 等. 北方城镇污水处理厂提标扩容 HPB 技术中试研究[J]. *中国给水排水*, 2023, 39(13): 81-87.
- HAN Hongbo, WANG Chengxian, MOU Yue, *et al.* Pilot test of HPB technology applied in upgrading and expansion of a municipal wastewater treatment plant in North China [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(13): 81-87 (in Chinese).
- [10] MERBT STEPHANIE N, AUGUET J, BLES A, *et al.* Wastewater treatment plant effluents change abundance and composition of ammonia-oxidizing microorganisms in mediterranean urban stream biofilms [J]. *Microbial Ecology*, 2015, 69(1): 66-74.
- [11] GONZALEZ-MARTINEZ A, RODRIGUEZ-SANCHEZ A, LOTTI T, *et al.* Comparison of bacterial communities of conventional and A-stage activated sludge systems [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 18786.
- [12] CUI D Z, SHEN D, WU C R, *et al.* Biodegradation of aniline by a novel bacterial mixed culture AC [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, 125: 86-96.
- [13] YANG C, TAN Z L, WANG L, *et al.* Higher impact resistance and lower antibiotic resistance genes proliferation rate in shortcut nitrification-denitrification process under long-term antibiotics selection pressure [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 471: 144704.
- [14] LI Y Z, CHEN Z, PENG Y Y, *et al.* Deeper insights into the effects of substrate to inoculum ratio selection on the relationship of kinetic parameters, microbial communities, and key metabolic pathways during the anaerobic digestion of food waste [J]. *Water Research*, 2022, 217: 118440.

作者简介: 张丽丽(1990-), 女, 江苏南京人, 硕士, 高级工程师, 主要从事污水处理厂运行管理工作。

E-mail: meiyuanzhanglili@126.com

收稿日期: 2024-03-25

修回日期: 2024-06-24

(编辑: 刘贵春)