

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.09.013

悬浮填料对大型污水处理厂运行的实际强化效果

王丽花¹, 王 坤², 周传庭³, 周 振²

(1. 上海城投污水处理有限公司, 上海 201203; 2. 上海电力大学 环境与化学工程学院, 上海 201306; 3. 上海市城市建设设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200125)

摘 要: 以两座大型污水处理厂为研究对象,分析了悬浮填料对生物处理系统的强化效果。结果表明,投加悬浮填料对有机物的削减能力影响不大,但提高了系统的抗冲击性能。投加填料促进了硝化菌的富集,但菌属类型受投加位置影响,填料位于好氧池前段有利于氨氧化菌(*norank_f_JG30-KF-CM45*和*Ellin6067*)的富集,位于后段则利于亚硝酸盐氧化菌(*Nitrospira*)的富集。悬浮填料提高了系统中反硝化菌的种类和丰度,并富集了好氧反硝化菌(*Hyphomicrobium*、*Flavobacterium*和*Dokdonella*),一定程度上提高了工艺的脱氮性能。值得注意的是,悬浮填料易于实现反硝化聚磷菌(DPB)的富集,可使DPB在聚磷菌(PAOs)中的占比达71.3%及以上。

关键词: 悬浮填料; 污水处理厂; 硝化; 反硝化聚磷菌

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)09-0077-07

Enhancing Effects of Suspended Packing Media on Operation of Large-scale Wastewater Treatment Plants

WANG Li-hua¹, WANG Kun², ZHOU Chuan-ting³, ZHOU Zhen²

(1. Shanghai Chengtou Wastewater Treatment Co. Ltd., Shanghai 201203, China; 2. College of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 201306, China; 3. Shanghai Urban Construction Design and Research Institute, Shanghai 200125, China)

Abstract: This paper analyzed the enhancing effect of suspended packing media on the biological treatment systems in two large-scale wastewater treatment plants. The addition of suspended packing media had little effect on the removal capacity of organic matters, but improved the impact resistance of the system. The addition of packing media promoted the enrichment of nitrifying bacteria, but the species of bacteria was affected by the location of packing media. The packing media in the front section of the aerobic tank was conducive to the enrichment of ammonia oxidizing bacteria (*norank_f_JG30-KF-CM45* and *Ellin6067*), while the packing media in the back section was conducive to the enrichment of nitrite oxidizing bacteria (*Nitrospira*). The suspended packing media increased the diversity and abundance of denitrifying bacteria in the system, and enriched the aerobic denitrifying bacteria (*Hyphomicrobium*, *Flavobacterium* and *Dokdonella*), which improved the nitrogen removal performance of the process to a certain extent. In particular, the suspended packing media was easy to achieve the enrichment of

基金项目: 上海市科技创新行动计划项目(21DZ1209805)

通信作者: 周振 E-mail: zhouzhen@shiep.edu.cn

denitrifying phosphorus accumulating bacteria (DPB), which increased the proportion of DPB in phosphorus accumulating bacteria (PAOs) up to 71.3% or more.

Key words: suspended packing media; wastewater treatment plant; nitrification; denitrifying phosphorus accumulating bacteria

在污水处理提质增效的背景下,各地污水处理厂相继开展了升级改造工作。移动床生物膜反应器(MBBR)因其耐冲击能力强、占地少、处理负荷高等特点,在污水处理厂提标改造中备受青睐^[1]。MBBR以轻质填料作为微生物生长载体,通过形成生物膜增加处理单元的生物量,并依靠填料的流动促使生物膜与污水充分接触,从而实现污水的高效处理。MBBR泥膜复合工艺能够同时满足硝化微生物长污泥龄和除磷功能菌短污泥龄的特异性需求,为经典脱氮除磷工艺存在的污泥龄矛盾问题提供了解决方式。因此,当污水处理厂进行新建或升级改造时,常在厌氧/缺氧/好氧(A²/O)等工艺中嵌入MBBR以强化生物处理。

尽管悬浮填料强化技术在多数试验和工程应用中已产生了良好的效果,但也有报道指出悬浮填料对污染物净化的强化程度未达到预期,其强化作用的发挥存在一定限制条件^[2]。为明确投加悬浮填料对污水处理厂运行的实际强化效果,笔者以两座采用A²/O+MBBR工艺的大型污水处理厂为研究对象,并结合相关文献数据,探究投加悬浮填料对污染物去除和微生物种群分布的内在影响。

1 材料与方法

1.1 污水处理厂概况

A厂处理规模为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,主体工艺为A²/O,2018年开始投加悬浮填料进行不停水升级改造,将好氧池前段部分池容改造为泥膜复合单元,形成A²/O+MBBR工艺。A厂厌氧池、缺氧池和好氧池的水力停留时间(HRT)分别为1.5、6.9和8.2 h,悬浮填料填充率为52%。内、外回流比分别为200%和100%,污泥龄为16.3 d。A厂设计进水COD、BOD₅、NH₄⁺-N、TN、TP分别为500、230、40、55、8 mg/L,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。

B厂为设计规模 $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的新建污水处理厂,主体工艺为水解酸化+A²/O+MBBR,悬浮填料投加于好氧池前段,填充率为28%。厌氧池、缺氧池

和好氧池的HRT分别为1.6、7.2和10.6 h(填料段占2.4 h),系统污泥龄为20.0 d。B厂内、外回流比均控制为200%。设计进水COD、BOD₅、NH₄⁺-N、TN和TP分别为500、230、40、60和8 mg/L,出水水质执行GB 18918—2002一级A标准,自2019年开始正式投产运行。

1.2 硝化和吸磷速率的测定

于2019年5月和2021年9月分别从A、B两厂采集活性污泥和填料,在实验室条件下进行硝化和吸磷速率的测定。取样时的平均气温分别为17和22℃,温度对微生物活性影响的差异性不大。

1.2.1 比硝化速率(SAUR)的测定

向2个烧杯中分别加入1.0 L活性污泥,其中一个烧杯按设计填充率投加悬浮填料(填料取自现场)。将烧杯置于20℃水浴锅中,使用气泵曝气控制DO为4~6 mg/L。加入氯化铵和碳酸氢钠溶液,控制起始NH₄⁺-N和碱度分别为44.7和300 mg/L。每隔一定时间从烧杯中取出20 mL混合液过滤,测定滤液中的NH₄⁺-N。将NH₄⁺-N与时间 t 进行线性拟合,直线斜率除以污泥浓度(MLSS)可得SAUR。

1.2.2 比缺氧吸磷速率(SPUR_A)的测定

向烧杯中加入1.0 L活性污泥,投加乙酸钠溶液使COD达504.7 mg/L,随后使污泥充分厌氧释磷2 h。释磷完成后,加入硝酸钾溶液使NO₃⁻-N为49.9 mg/L,于20℃恒温箱中通过磁力搅拌器缺氧搅拌,使污泥处于完全混合状态。每隔一定时间取样过滤,测定滤液中的PO₄³⁻-P。将PO₄³⁻-P与时间 t 进行线性拟合,直线斜率除以MLSS可得SPUR_A。

1.2.3 比好氧吸磷速率(SPUR_O)的测定

向2个烧杯中分别加入1.0 L活性污泥,其中一个烧杯额外投加悬浮填料。加入乙酸钠溶液(COD=504.7 mg/L),使污泥厌氧释磷2 h。释磷完成后,将烧杯置于20℃水浴锅中曝气(DO=4~6 mg/L)。每隔一定时间取样过滤,将滤液的PO₄³⁻-P与时间 t 进行线性拟合,直线斜率除以MLSS可得SPUR_O。

1.3 微生物多样性分析

分别采集A厂和B厂好氧池活性污泥和悬浮填料表面生物膜样品,每组样本采集3份平行样,在 -20°C 条件下保存,随后将样品送往生物公司,按照Jiang等^[3]报道的方法于一周内进行DNA提取、PCR扩增和扩增子纯化,并于Illumina MiSeq测序平台进行测序。测序采用的引物为338F(5'-ACTCCTRC-GGGAGGCAGCAG-3')和806R(5'-GGACTACHVG-GGTWTCTAAT-3')。

1.4 常规指标测定

COD、 NH_4^+-N 、TN、TP、 NO_3^--N 和 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 均按照国家标准方法进行测定。

2 结果与讨论

2.1 长期运行特性分析

为明确投加悬浮填料对污水处理厂污染物去除性能的改善情况,对A厂和B厂两年多来的进、出水水质进行分析,结果见图1。可知,升级改造前A厂进水和出水COD平均浓度为 (373.9 ± 59.7) 和 (31.4 ± 2.9) mg/L,平均去除率为 $(91.5 \pm 1.3)\%$ 。升级改造工程待生物膜基本成熟后,出水平均COD为 (20.4 ± 1.5) mg/L,平均去除率为 $(93.1 \pm 0.8)\%$ 。升级改造使A厂的COD去除率提高约1.6%,说明投加悬浮填料后,A²/O工艺的有机物削减能力略有提升。

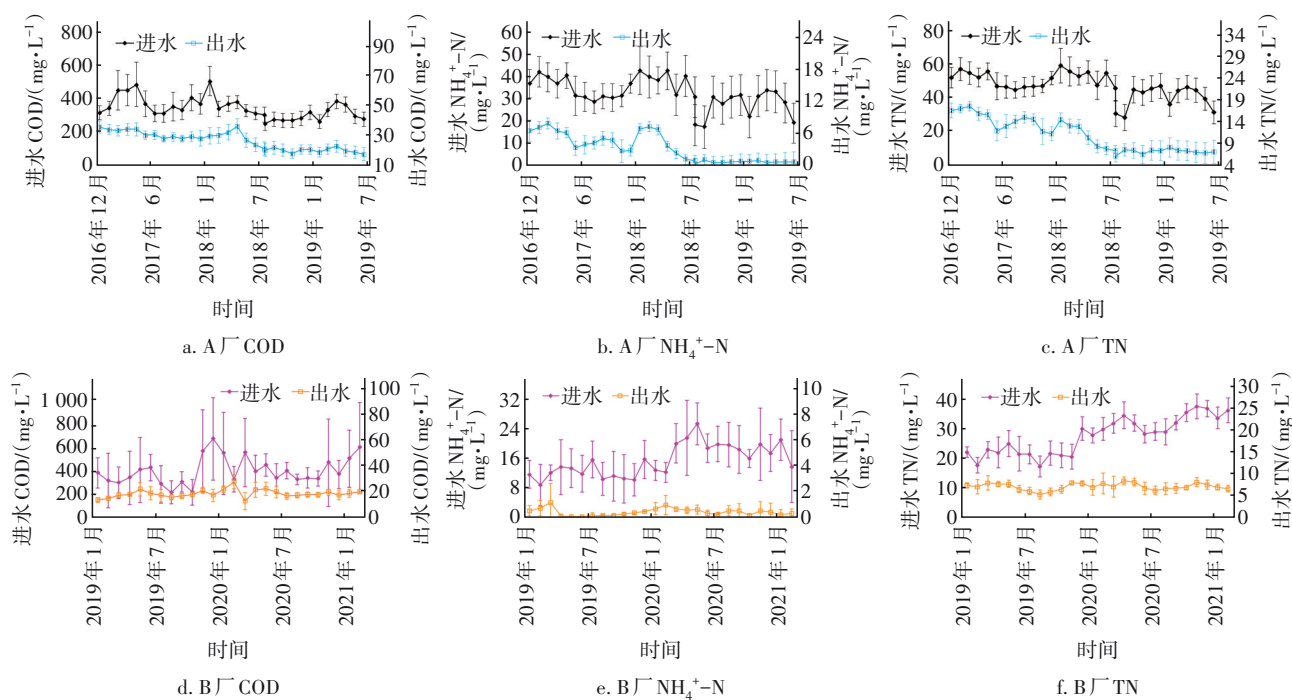


图1 长期运行下A、B两厂有机物和含氮污染物的去除性能

Fig.1 Removal of organic matters and nitrogen pollutants during the long-term operation of WWTP A and WWTP B

在B厂运行初期,进水COD月均浓度为213.5~665.5 mg/L,出水COD为13.6~27.5 mg/L,COD月均去除率为91.5%~97.4%。在稳定运行期间,B厂进、出水COD浓度与运行初期较为接近,月均去除率为94.0%~97.7%。生物膜成熟前后,污水厂COD去除率变化不大。值得注意的是,冬季时B厂发生过几次较大的有机物负荷冲击,进水COD最高可达1556 mg/L。尽管进水COD较高而且当时气温较低($<12^{\circ}\text{C}$),但出水COD始终保持在27.5 mg/L以下,未出现明显波动,这表明投加填料的生物系统具有良好的抗有机负荷冲击能力。

2017年A厂进水和出水 NH_4^+-N 平均浓度分别为 (34.5 ± 4.6) 和 (5.0 ± 1.8) mg/L,当进水 NH_4^+-N 较高时,出水 NH_4^+-N 无法达到一级A标准,原A²/O工艺的平均去除率仅为85.7%。升级改造后A厂出水 NH_4^+-N 逐步降低,运行稳定期平均值降至 (0.6 ± 0.2) mg/L,远低于一级A限值,工艺平均去除率提升至97.6%,且出水水质稳定性也明显提高。B厂运行初期,进、出水 NH_4^+-N 分别为 (12.2 ± 3.8) 和 (0.4 ± 0.3) mg/L;在稳定运行期,进水 NH_4^+-N 升高至 (19.3 ± 3.5) mg/L,而出水 NH_4^+-N 基本不变,平均去除率提升至97.7%。

由于污水处理厂进水氮组分主要为 NH_4^+-N , A厂和B厂进水TN浓度变化与 NH_4^+-N 基本一致。A厂在升级改造前后稳定运行阶段的TN平均去除率分别为71.1%和82.0%,升级改造使 NH_4^+-N 和TN的削减量分别提升了4.4和7.3 mg/L,说明投加悬浮填料强化了系统的反硝化脱氮性能,其原因可能是生物膜中发生了同步硝化反硝化(SND)或好氧反硝化。同样地,随着生物膜的完全成熟,B厂在进水TN升高44.4%的情况下,出水仍稳定保持在 (7.1 ± 1.1) mg/L, TN平均去除率达 $(78.7 \pm 2.0)\%$,表明投加填料可改善系统对TN的削减效果。

2.2 微生物种群分析

2.2.1 投加填料后硝化菌的分布

图2为A厂和B厂脱氮除磷功能菌在属水平上的分布情况,主要包括氨氧化菌(AOB)、亚硝酸盐氧化菌(NO₂-)、反硝化菌(DNB)、聚磷菌(PAOs)和反硝化聚磷菌(DPB),图中的微生物至少在一个样本中相对丰度大于1%。

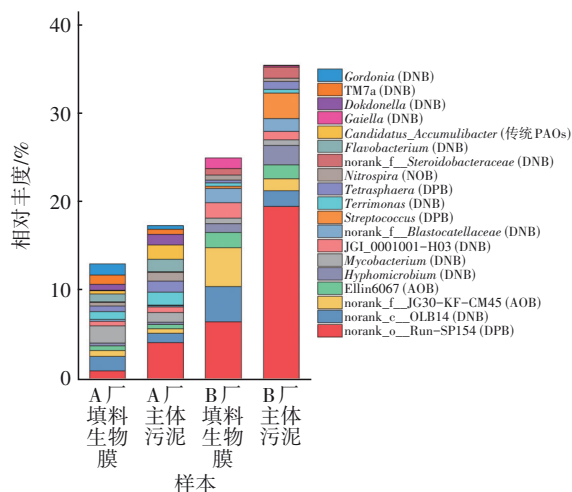


图2 A、B两厂的脱氮除磷功能菌属分布

Fig.2 Distribution of functional bacteria for nitrogen and phosphorus removal in WWTP A and WWTP B

由图2可知,A厂和B厂共同富集的优势AOB有2种,分别为norank_f_JG30-KF-CM45^[4]和Ellin6067^[5]。前者在两厂填料表面生物膜的相对丰度分别为0.7%和4.4%,在主体污泥中则分别为0.5%和1.4%;后者在两厂填料表面生物膜的相对丰度分别为0.5%和1.7%,在主体污泥中则分别为0.5%和1.6%。*Nitrospira*是两厂共有的优势NOB,在A厂和B厂生物膜中的相对丰度分别为0.4%和0.6%,在主体污泥中分别为1.0%和0.4%。

A、B两厂生物膜中AOB的相对丰度是NOB的2.7~9.9倍,而在国内采用填料强化工艺的污水处理厂中,生物膜上的NOB丰度则普遍高于AOB(见表1),这可能与填料投加位置有关。A、B两厂填料均投加在好氧池前段,而其他厂多数投加在好氧池中部或遍布全池。

表1 国内污水处理厂泥膜复合系统中硝化菌的分布

Tab.1 Distribution of nitrifying bacteria in sludge-biofilm composite systems from domestic WWTPs %

工艺	填料位置	硝化菌		
		种类	填料上丰度	污泥中丰度
Bardenpho+MBBR	一级好氧池全池 ^[6]	<i>Nitrospira</i> (NOB)	30.38	3.07
		<i>Nitrosomonas</i> (AOB)	1.81	0.43
	一级好氧池中部 ^[7]	<i>Nitrospira</i> (NOB)	27.8	3.80
		<i>Nitrosomonas</i> (AOB)	2.50	0.50
AAO+MBBR	好氧池(位置未知) ^[8]	<i>Nitrospira</i> (NOB)	1.9(夏季)	0.96(夏季)
			4.89(冬季)	1.19(冬季)
	好氧池全池 ^[9]	<i>Nitrospira</i> (NOB)	6.54	1.52
		<i>Nitrosomonas</i> (AOB)	5.16	0.80
	好氧池第1、2廊道(共3条廊道) ^[10]	<i>Nitrolancea</i> (NOB)	2.86(廊道1)	0.13
			3.76(廊道2)	
氧化沟+MBBR	好氧区全区 ^[11]	<i>Nitrospira</i> (NOB)	6.57	2.01
		<i>Nitrosomonas</i> (AOB)	0.28	0.16

由表1可知,*Nitrospira*是我国污水处理厂中最主要的NOB。研究表明^[6],*Nitrospira*适宜生长在低 NH_4^+-N 环境下,而好氧池中 NH_4^+-N 浓度沿污水流向逐步降低,因此理论上填料投加位置越靠后,生物膜中*Nitrospira*的丰度越高。此外,表1各厂中普遍处于优势地位的AOB为*Nitrosomonas*,其在A厂和B厂生物膜中的丰度仅为0.16%和0.01%,这可能与系统中*Nitrosomonas*的具体优势菌种有关。若菌种为*Nitrosomonas mobilis*和*Nitrosomonas europaea*,由于其底物亲和力低、生长速率快,易富集在高 NH_4^+-N 浓度的好氧池前段;而若为*Nitrosomonas oligotropha*则相反,更倾向于生长在低 NH_4^+-N 环境下,即好氧池后段。

综合来看,生物膜中硝化菌的整体比例因填料位置呈现“前低后高”的分布,这也与以往学者们的观点一致,即当填料投加在好氧池中后段时,较高总凯氏氮/COD的环境有利于硝化菌增殖和发挥活性^[12]。

2.2.2 投加填料后反硝化菌的分布

与生物膜中硝化菌整体比例较低的情况相反,A厂和B厂生物膜中均存在丰富的DNB。由图2可知,A、B两厂共富集了12种优势DNB,它们在生物膜中的总丰度分别为9.5%和11.3%。而表1中填料位于好氧池中部或遍布全池的大部分污水处理厂,其DNB丰度均小于6.46%,这与填料上DNB可以在好氧池前段获得更为充足的有机物有关。在A、B两厂及表1各厂的好氧/MBBR单元中均出现了不同程度的TN去除,这是因为生物膜中存在DO梯度,硝化产物 NO_3^- -N可在内层被DNB还原。此外,A、B两厂的12种优势DNB中,有3种是好氧反硝化菌,分别为*Hyphomicrobium*、*Flavobacterium*和*Dokdonella*,这说明好氧反硝化很可能是好氧池TN去除的重要途径。此外,好氧反硝化菌在主体污泥中的整体丰度(2.8%和2.2%)高于生物膜(1.9%和1.0%),这可能是因为污泥絮体中底物和DO的传质效率更高,更利于好氧反硝化菌富集。

2.2.3 投加填料后传统PAOs和DPB的分布

在A、B两厂中共发现了4种优势PAOs,分别为norank_o__Run-SP154(DPB)、*Streptococcus*(DPB)、*Tetrasphaera*(DPB)和*Candidatus_Accumulibacter*(传统PAOs)^[13]。其中,norank_o__Run-SP154是A、B两厂最主要的DPB,在生活污水处理、工业废水处理和污泥厌氧消化系统中均有发现^[14-16],但罕有对其性状和功能方面的具体描述,仅Chen等^[14]研究发现norank_o__Run-SP154可在氧气有限的条件下参与除磷,而*Streptococcus*和*Tetrasphaera*则是广泛报道的DPB^[13]。

A、B两厂生物膜中的PAOs总丰度分别为1.9%和6.9%,主体污泥的PAOs丰度则显著高于生物膜,分别为7.0%和23.2%。4种优势PAOs也同样表现出主体污泥丰度高、生物膜丰度低的分布规律。表1的部分污水处理厂中也发现了丰度较高的PAOs,且分布规律与A、B两厂相同,如浙江^[6](*Dechloromonas*:生物膜为0.16%,污泥为1.74%)、西藏^[10](*Tetrasphaera*:生物膜为0.28%、0.60%,污泥为6.21%) and 唐山^[11]

(*Dechloromonas*:生物膜<1.85%,污泥为3.33%)等污水厂。这说明在泥膜复合系统中,短泥龄的PAOs主要富集于主体污泥中。

A厂生物膜和主体污泥中的DPB/PAOs分别为82.0%和76.6%,而B厂中的传统PAOs基本全部被DPB替代,该比例达99%以上。A、B两厂中DPB占据主导地位,这可能同样与填料投加于好氧池前段有关。首先,填料表面生物膜形成了具有DO和底物浓度梯度的微环境,使部分DPB在好氧/MBBR单元中经历了厌氧-缺氧-好氧过程,有利于DPB在生物膜中富集并维持活性^[17]。而设置在好氧池前段的填料区实际上增加了缺氧HRT,由于在泥膜复合系统中反硝化聚磷能力随着缺氧容积的增大而提高^[18],进一步提升了生物膜和主体污泥中DPB的活性和丰度。而主体污泥中DPB可更充分地经历厌氧-缺氧-好氧循环,增殖空间更充足,底物更丰富,因而A、B两厂主体污泥中的DPB丰度数倍于生物膜中。此外,B厂的DPB丰度高于A厂,这可能与B厂外回流比长期维持在200%有关,更多的PAOs可完整经历厌氧释磷、缺氧和好氧吸磷过程。但也正因如此,外回流中较高浓度的 NO_3^- -N对厌氧释磷产生了一定的抑制作用,从而使B厂的生物除磷效果并不显著。据测算,B厂生物除磷量占进水总磷的89.1%,而A厂为93.9%。

2.3 脱氮除磷速率分析

表2为A、B两厂投加填料前后的脱氮除磷活性。可知,A厂主体污泥的SAUR为2.52 mg/(gSS·h),以57%的填充率投加悬浮填料后,系统的SAUR提升至2.79 mg/(gSS·h),与投加填料前较为接近。同样地,B厂泥膜复合系统的SAUR仅比主体污泥高0.12 mg/(gSS·h)。这说明相较于对系统中硝化菌丰度的提高程度,投加填料对硝化菌活性的提升比例较低。

由于两厂主体污泥中PAOs的丰度显著高于生物膜,投加填料对SPUR₀的提升有限,仅提高了17.0%~28.0%。此外,B厂PAOs的SPUR_A和SPUR₀均低于A厂,这可能与B厂长期高外回流导致系统中PAOs活性受到抑制有关,同时也说明了norank_o__Run-SP154是一种适应此环境条件且吸磷性能不强的DPB。SPUR_A与SPUR₀的比值可在一定程度上反映系统中DPB占PAOs的比例^[19]。根据此法计算得到A、B两厂的DPB/PAOs≥71.3%,与根

据优势菌属相对丰度计算得到的数值较为接近,证明了投加悬浮填料对DPB富集的促进作用。

表2 A、B两厂的脱氮除磷活性比较

Tab.2 Comparison of nitrogen and phosphorus removal activities between WWTP A and WWTP B

样品	SAUR/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ $\text{SS} \cdot \text{h}^{-1}$)	SPUR _A / ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ $\text{SS} \cdot \text{h}^{-1}$)	SPUR ₀ / ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{SS} \cdot$ h^{-1})	SPUR _A : SPUR ₀ /%
A厂主体 污泥	2.52	3.47	4.87	71.3
A厂污泥+ 填料	2.79	—	5.70	—
B厂主体 污泥	1.63	0.84	1.00	84.0
B厂污泥+ 填料	1.75	—	1.28	—

通过对2座污水处理厂的分析及文献数据对比可知,悬浮填料对生物处理系统表现为多方面的强化作用,且强化效应与投加点位密切相关。强化硝化作用时,悬浮填料宜投加于好氧池中段;若要全面提高污染物去除和抗冲击能力,悬浮填料宜投加于好氧池前段。这一策略不仅有助于SND效应,还可通过DPB的富集实现“一碳两用”,对我国污水处理厂普遍存在的低进水碳源条件下的脱氮除磷具有重要意义。

3 结论

① 投加悬浮填料提高了系统的抗有机负荷冲击能力,并在一定程度上改善了硝化活性,使 NH_4^+-N 去除率提升了11.9%。

② 悬浮填料在好氧池中的投加位置影响生物膜中硝化菌的种类,填料位于好氧池前段有利于AOB(*norank_f__JG30-KF-CM45*和*Ellin6067*)的富集,位于后段则利于NOB(*Nitrospira*)的富集。

③ 投加悬浮填料提高了系统中DNB的丰度和种类,并富集了好氧反硝化菌(*Hyphomicrobium*、*Flavobacterium*和*Dokdonella*),提高了工艺的脱氮性能。

④ 悬浮填料促进了DPB在系统中的富集,使得DPB/PAOs达71.3%及以上。

参考文献:

[1] 常尧枫,谢嘉玮,谢军祥,等. 城镇污水处理厂提标

改造技术研究进展[J]. 中国给水排水, 2022, 38(6): 20-28.

CHANG Yaofeng, XIE Jiawei, XIE Junxiang, *et al.* Research progress on upgrading and reconstruction technology of urban sewage treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(6): 20-28 (in Chinese).

[2] 郝晓地,安兆伟,孙晓明,等. 悬浮填料强化污水生物处理的实际作用揭示[J]. 中国给水排水, 2013, 29(8): 5-9.

HAO Xiaodi, AN Zhaowei, SUN Xiaoming, *et al.* Effect of suspended carriers on enhancing biological wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(8): 5-9(in Chinese).

[3] JIANG J, ZHOU Z, JIANG L, *et al.* Bacterial and microfauna mechanisms for sludge reduction in carrier-enhanced anaerobic side-stream reactors revealed by metagenomic sequencing analysis [J]. Environmental Science & Technology, 2021, 55(9): 6257-6269.

[4] HUANG X, DONG W, WANG H, *et al.* Biological nutrient removal and molecular biological characteristics in an anaerobic-multistage anaerobic/oxic (A-MAO) process to treat municipal wastewater [J]. Bioresource Technology, 2017, 241: 969-978.

[5] FENG J, ZHANG Q, TAN B, *et al.* Microbial community and metabolic characteristics evaluation in start-up stage of electro-enhanced SBR for aniline wastewater treatment [J]. Journal of Water Process Engineering, 2022, 45: 102489.

[6] 郭莉芳,朱宇峰,滕良方,等. MBBR用于南方某污水厂强化脱氮效果分析[J]. 中国给水排水, 2020, 36(7): 101-107.

GUO Lifang, ZHU Yufeng, TENG Liangfang, *et al.* Analysis of denitrification efficiency of a wastewater treatment plant in South China enhanced by MBBR [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(7): 101-107(in Chinese).

[7] 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, ZHEN 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).

[8] 黄崇,袁林江,牛晚霞,等. 投加填料对微生物群落

- 结构的影响及对水质的变化研究[J]. 中国环境科学, 2021, 41(1): 207-213.
- HUANG Chong, YUAN Linjiang, NIU Wanxia, *et al.* Effect of dosing suspended fillers on microbial community structure and investigation on variation in water quality [J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(1): 207-213(in Chinese).
- [9] 吴迪, 周家中, 郑志佳, 等. MBBR用于山西某污水厂提标改造效果分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(15): 6-11.
- WU Di, ZHOU Jiazhong, ZHENG Zhijia, *et al.* Application of MBBR process to upgrading and reconstruction of WWTP in Shanxi Province [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(15): 6-11 (in Chinese).
- [10] 李志伟, 赵治东, 祁学玲, 等. MBBR在西藏某污水厂低温环境的应用效果分析[J]. 工业水处理, 2023, 43(8): 1-15.
- LI Zhiwei, ZHAO Zhidong, QI Xueling, *et al.* Application analysis of MBBR in a wastewater treatment plant of Tibet with low temperature [J]. *Industrial Water Treatment*, 2023, 43(8): 1-15(in Chinese).
- [11] 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).
- [12] 董滨, 周增炎, 高廷耀. 投料A²/O工艺硝化特性[J]. 给水排水, 2004, 30(9): 50-52.
- DONG Bin, ZHOU Zengyan, GAO Tingyao. Nitrification character of moving bed A²/O process [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2004, 30(9): 50-52 (in Chinese).
- [13] WANG K, ZHOU C, ZHOU H, *et al.* Comparison on biological nutrient removal and microbial community between full-scale anaerobic/anoxic/aerobic process and its upgrading processes [J]. *Bioresource Technology*, 2023, 374: 128757.
- [14] CHEN H, ZHOU W, XU Z, *et al.* Nitrogen and phosphorus removal by GAOs and PAOs using nitrate and limited oxygen as electron acceptors simultaneously and the impact of external carbon source in the anoxic phase [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(6): 106520.
- [15] CAO J, ZHU Q, ZHANG T, *et al.* Distribution patterns of microbial community and functional characteristics in full-scale wastewater treatment plants: focusing on the influent types[J]. *Chemosphere*, 2021, 281: 130899.
- [16] ZENG S, SUN J, CHEN Z, *et al.* The impact and fate of clarithromycin in anaerobic digestion of waste activated sludge for biogas production [J]. *Environmental Research*, 2021, 195: 110792.
- [17] 张玉君, 李冬, 李帅, 等. 间歇梯度曝气的生活污水好氧颗粒污泥脱氮除磷[J]. 环境科学, 2020, 41(8): 3707-3714.
- ZHANG Yujun, LI Dong, LI Shuai, *et al.* Nitrogen and phosphorus removal from domestic sewage aerobic granular sludge under intermittent gradient aeration [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(8): 3707-3714 (in Chinese).
- [18] XU X, LIU G H, LI Q, *et al.* Optimization nutrient removal at different volume ratio of anoxic-to-aerobic zone in integrated fixed-film activated sludge (IFAS) system [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 795: 148824.
- [19] ZHANG M, ZHU C, PAN T, *et al.* Elucidating sludge characteristic, substrate transformation and microbial evolution in a two-sludge denitrifying phosphorus removal system under the impact of HRT[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 262: 110391.
-
- 作者简介:王丽花(1973-),女,山西朔州人,博士,高级工程师,主要从事污水、污泥处理及资源化利用方面的技术研究。
- E-mail:wanglihua73@aliyun.com
- 收稿日期:2023-04-13
- 修回日期:2023-04-25

(编辑:沈靖怡)