

王敏, 吴绪军, 许克建, 等. 不同材质 MBBR 填料降解微污染河道水及合流污水氨氮[J]. 净水技术, 2024, 43(12): 103-110.

WANG M, WU X J, XU K J, et al. Degradation of ammonia nitrogen in micro-polluted river water and combined sewage by MBBR with different packings[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(12): 103-110.

不同材质 MBBR 填料降解微污染河道水及合流污水氨氮

王敏¹, 吴绪军^{2,*}, 许克建³, 仝振业⁴

(1. 水艺环保集团股份有限公司, 浙江宁波 315336; 2. 长兴瓊晟环保科技有限公司, 浙江湖州 313100; 3. 宣城市宣州区洪林镇人民政府, 安徽宣城 242053; 4. 南京工业大学生物与制药工程学院, 江苏南京 211816)

摘要 移动床生物膜反应器(MBBR)对污水具有较强的脱氮能力,反应器中填料材质也是影响脱氮能力的重要因素。通过在 MBBR-AO 耦合工艺污水处理过程中投加聚乙烯(PE)生物载体填料和聚氨酯多孔(PPC)凝胶载体填料,探究了填料材质对微污染河道水体及雨污混流污水氨氮降解的影响以及不同材质填料的微生物挂膜速度和使用寿命。结果表明,与 PPC 材质填料相比,PE 材质填料挂膜速度更慢,但其使用寿命更长。同时,PE 材质填料的投加更有利于 MBBR-AO 耦合工艺短期和长期运行过程中降解微污染河道水体和雨污混流污水中的氨氮。该研究成果可为污水处理过程中填料材质的选择提供现实指导意义。

关键词 移动床生物膜反应器(MBBR) 生物载体填料 微生物挂膜速度 使用寿命 氨氮去除率

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2024)12-0103-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.12.012

Degradation of Ammonia Nitrogen in Micro-Polluted River Water and Combined Sewage by MBBR with Different Packings

WANG Min¹, WU Xujun^{2,*}, XU Kejian³, TONG Zhenye⁴

(1. Shuiyi Environmental Protection Group Co., Ltd., Ningbo 315336, China;

2. Changxing Yusheng Environmental Protection Technology Co., Ltd., Huzhou 313100, China;

3. People's Government of Honglin Town, Xuancheng District, Xuancheng 242053, China;

4. College of Biotechnology and Pharmaceutical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract Moving bed biofilm reactor (MBBR) has a strong nitrogen removal capacity for wastewater, and the material of the filler in the reactor is also an important factor affecting the nitrogen removal capacity. By adding polyethylene (PE) bio-carrier filler and polyurethane porous (PPC) gel carrier filler in the MBBR-AO coupled process wastewater treatment process, the effects of filler materials on the degradation of ammonia nitrogen in micro-polluted river water and rainwater and wastewater effluent, as well as microorganisms' film-attachment speed and service life of different filler materials were investigated. The results showed that compared with the PPC filler, the PE filler had a slower film hanging speed, but its service life was longer. At the same time, the addition of PE filler was more conducive to the degradation of ammonia and nitrogen in the MBBR-AO coupled process in both short-term and long-term operation of micro-polluted river water and mixed flow rainwater and wastewater. The results of this research can provide practical guidance for the selection of filler materials in wastewater treatment process.

Keywords moving bed biofilm reactor (MBBR) bio-carrier filler micr-bio film formation speed service life removal rate of ammonia nitrogen

[收稿日期] 2024-02-22

[基金项目] 山西省重点研发计划(201903D211013)

[作者简介] 王敏(1983—),男,硕士,主要从事水污染工程类相关工作,E-mail:katawang@163.com。

[通信作者] 吴绪军,男,主要从事水污染控制方面的技术和管理工作,E-mail:wxf1385@163.com。

移动床生物膜反应器(MBBR)兼具活性污泥法与传统生物膜法的优点,是现代污水生物处理技术中一种具有革命性的创新工艺^[1]。此前大量的研究表明,MBBR 工艺能够有效缓解城镇污水的脱氮压力^[2-4]。MBBR 工艺生物载体填料能够将

生物膜输送至全反应器,促进生物膜、氧气和反应底物之间的相互接触,提高降解反应效率,因其特有的稳定性和密度特性使其具有较为广阔的应用前景^[5]。

目前 MBBR 生物载体填料大多以聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚氨酯(PU)和聚氨酯多孔(PPC)等材质为主。其中 PE 材质的 MBBR 填料对污水中的色度、COD_{Cr}、氨氮、总氮、总有机碳和挥发性酚类等物质具有良好的去除效果;PP 填料多用于 MBBR 组合工艺中,如 MBBR 与 AO 组合工艺、MBBR-MBR 组合工艺等;PU 和 PPC 填料具有较高的孔隙率,可为微生物提供更大的附着面积,使微生物快速、稳定地生长,从而有效去除污水中有机污染物和各种营养物^[6-7]。PE 材质和 PPC 材质填料是目前应用较广泛的 2 种填料,其中,PE 材质填料应用更为广泛且效能较好,而 PPC 材质填料亲水性更强,比表面积更大,更有利于微生物的附着^[8]。2 种填料各有优劣,且均具有良好的机械强度和低成本,然而关于它们在 MBBR-AO 耦合工艺中去除微污染河道水体及雨污混流污水中氨氮的研究却鲜有报道。文章探究了在 MBBR-AO 耦合工艺中投加不同类型 MBBR 生物载体填料(PE 和 PPC 材质)对微污染河道水体及雨污混流污水中氨氮去除效果的影响,同步分析了不同类型 MBBR 生物载体填料的微生物挂膜速度、使用寿命,旨在提高 MBBR 工艺在污水处理中对不同类型 MBBR 生物载体填料的具体选择手段。

1 污水处理工艺

1.1 工艺流程及生物载体填料情况

本研究中使用的污水处理装置为自主设计的生物流化床反应器,采用 MBBR-AO 耦合工艺,主要工艺流程如图 1(a)所示,具体装置包括格栅、提升泵、MBBR 生物载体填料、一体化高效生物脱氮箱体、高效沉淀池、曝气系统等。反应器进水流量为 50 m³/d (约为 2 m³/h),有效停留时间为 5 h,反应器有效容积约为 10 m³。

污水处理装置中的 MBBR 生物载体填料选用 PE 类填料和 PPC 凝胶载体填料。PE 类填料形状呈环形放射状,尺寸为 $\Phi 25$ mm \times 10 mm,19 孔,通道形状为五边形,比表面积约为 500 m²/m³ [图 1(b)];PPC 凝胶载体填料形状呈立方体,尺寸为

$\Phi 10$ mm \times 10 mm \times 10 mm,比表面积约为 5 000 m²/m³ [图 1(c)]。

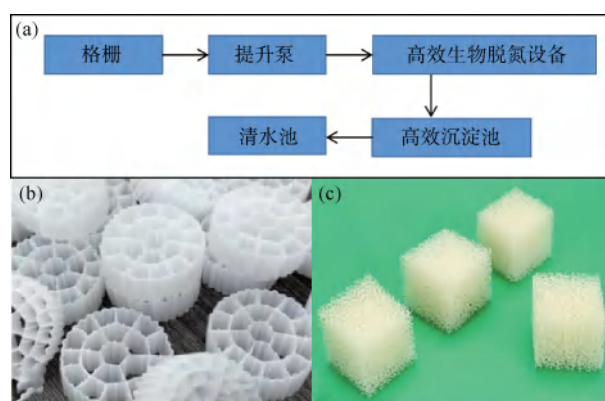


图 1 (a)生物流化床反应器流程;(b)PE 生物载体填料和(c)PPC 凝胶载体填料

Fig. 1 (a) Bio-Fluidised Bed Reactor Device Procedure; (b) PE-Based Bio-Carrier Filler and (c) PPC Gel Carrier Filler

1.2 污水水质情况

研究中,利用污水处理装置对微污染河道水体和雨污混流污水这 2 种水体进行处理。其中微污染河道水体为浙江某地区受污染程度较低的城市河道水体,水体氨氮浓度相对较低,平均质量浓度为 5 mg/L。雨污混流污水为浙江某污水厂 2 个污水泵站(泵站一和泵站二)的进水水源,水质氨氮浓度相对较高,质量浓度为 3~20 mg/L,这是由于降雨期间空气中的部分氮氧化物与雨水反应生成硝酸或硝酸盐,更易于氨氧化细菌繁殖^[9],导致其污水氨氮含量相对较高。同时,2 种水体的 pH 值均维持在 7~9。

1.3 污水处理装置运行参数

1.3.1 前期挂膜过程

污水处理系统采用分批投加填料挂膜方式启动,根据反应器内填料实际流化效果,确定最终投加填料体积分数为 20%。启动过程系统悬浮污泥不回流,污水处理过程中污泥回流比为 1:8。

1.3.2 装置运行参数控制

污水处理装置在室温(20 ℃)下运行,装置底部的曝气设备用于控制污水处理过程中的曝气量,同时控制装置进水流量为 2 m³/h,污水处理过程中其他参数均保持基本一致。选取泵站一、泵站二雨污混流污水及微污染河道水体作为进水水样。

2 结果与讨论

2.1 不同材质 MBBR 填料挂膜速度

污水处理装置启动阶段,进水水质稳定,分批投加填料后,填料进行正常挂膜成型。

相同运行条件下,不同材质的生物载体填料由于其自身特性不同导致其挂膜成型速度具有较大差异^[10]。PE 类填料挂膜速度较慢,需要投加葡萄糖等药剂进行闷曝培养。通过观察 PE 材质填料和 PPC 材质填料在 MBBR-AO 耦合工艺中的运行状况发现,PE 材质填料投加后约 5 d,载体表面出现黄褐色生物膜薄层,继续运行约 1 周后载体表面出现大量草履虫、累枝虫、轮虫及少量钟形虫,表明生物膜基本成熟,此时系统启动完成;而 PPC 填料挂膜速度较快,约 3 d 生物膜基本成熟,同时可将污泥吸附至填料内部。生物膜的形成有助于提高氨氧化细菌的活性^[11]。相较于 PE 材质填料,PPC 材质填料的大比表面积更有利于生物膜的形成和微生物的固定^[12]。

同一种 PE 材质的填料处理不同类型的污水,填料的挂膜效果也有较大的差异。由图 2(a)中可知,微污染河道水体中 PE 材质填料的表面存在淡褐色的生物膜薄层;但由图 2(b)可知,雨污混流污水中 PE 材质填料表面的生物膜层呈现碎片化,表明 PE 材质填料在微污染河道水体中的挂膜效果显著优于其在雨污混流污水中的挂膜效果。由图 2(c)和图 2(d)中可知,PPC 材质填料在微污染河道水体和雨污混流污水中的挂膜效果差异并不显著。

2.2 不同材质生物载体填料降解污水中氨氮的能力

氨氮含量是评估泵站污水实际处理效果的重要考核指标。因此,氨氮降解能力对于 MBBR-AO 耦合工艺中生物载体填料种类的选用有重要的实践指导意义。

2.2.1 工艺短期运行过程中 PE 和 PPC 2 种填料降解微污染河道水体氨氮的效果

由图 3 可知,投加 PE 材质填料和 PPC 材质填料的 MBBR-AO 耦合工艺进水氨氮平均质量浓度为 3.69 mg/L 和 3.39 mg/L,同时实际进水的氨氮浓度出现较大幅度的波动,这是降雨所导致。在投加 PE 材质填料的工艺中,微污染河道水体的氨氮平均去除量和氨氮平均去除率分别为 3.12 mg/L 和 84.55%,高于投加 PPC 材质填料工艺的 2.56 mg/L

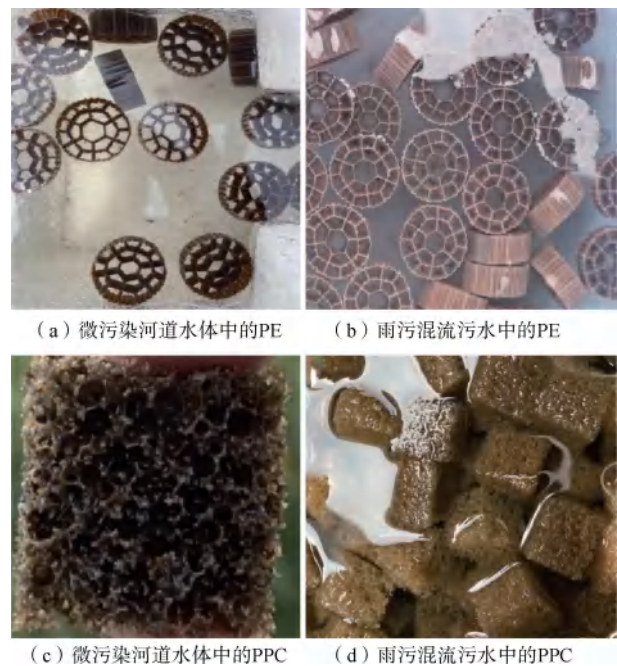


图 2 生物载体填料在不同污水中的挂膜

Fig. 2 Bio-Carrier Filler in Different Wastewater Biofilm Formation

和 75.52%,表明短期内(12 d 内)在 MBBR-AO 耦合工艺投加 PE 材质填料更有利于微污染河道水体中氨氮的去除。

2.2.2 工艺短期运行过程中 PE 和 PPC 降解雨污混流污水氨氮的效果

如图 4 所示,投加 PE 材质填料的 MBBR-AO 耦合工艺短期(18 d)运行过程中泵站一[图 4(a)]和泵站二[图 4(b)]雨污混流污水的进水氨氮平均质量浓度分别为 7.24 mg/L 和 9.35 mg/L。在 MBBR-AO 耦合工艺的短期(18 d)处理泵站一和泵站二雨污混流污水的过程中投加 PE 材质填料,出水中的氨氮浓度显著下降,其中氨氮的平均去除量分别为 6.93 mg/L 和 7.9 mg/L,氨氮的平均去除率分别为 95.71% 和 84.49%。泵站一雨污混流污水短期(18 d)处理过程中,氨氮的去除率均保持在 90% 以上,在第 9 d 时氨氮的去除率接近 100%,经过处理后的污水可能更有利于附着性微生物的生长,从而促进了氨氮的去除。同时,泵站二雨污混流污水短期(18 d)处理过程中,氨氮的去除率多数保持在 90% 左右,表明在 MBBR-AO 耦合工艺中投加 PE 材质填料短期内(18 d)对雨污混流污水中的氨氮具有较强的去除效果。

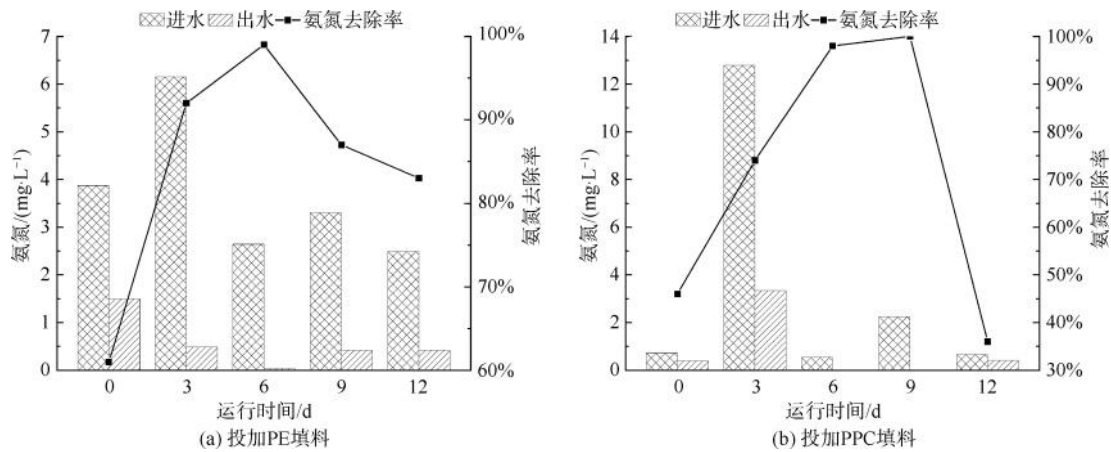


图3 污水处理装置短期运行过程中微污染河道水体中氨氮浓度的变化

Fig. 3 Changes of Ammonia-Nitrogen Concentrations in Micro-Polluted River Water during Short-Term Operation of Wastewater Treatment Equipment

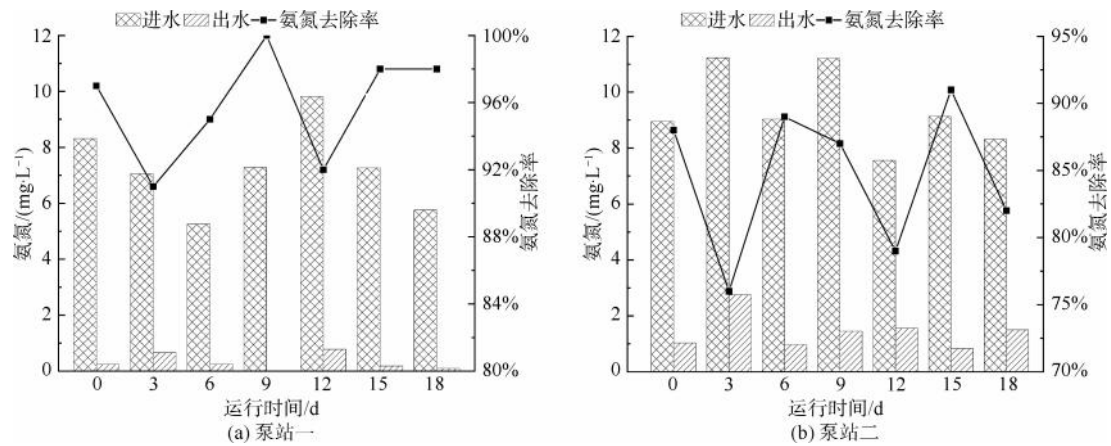


图4 污水处理装置短期运行过程中泵站雨污混流污水中氨氮浓度的变化(投加 PE 填料)

Fig. 4 Changes of Ammonia Nitrogen Concentration of Combined Wastewater from Pumping Station during Short-Term Operation of Wastewater Treatment Equipment (with PE Filler)

如图5所示,投加 PPC 材质填料的 MBBR-AO 耦合工艺中泵站一[图5(a)]和泵站二[图5(b)]雨污混流污水的进水氨氮质量浓度分别为 3~20 mg/L 和 3~22 mg/L,进水中氨氮浓度的波动范围较大,这可能是降雨导致空气中的氮氧化物进入到污水体系中,造成进水中氨氮浓度出现较大的波动。泵站一和泵站二雨污混流污水的进水氨氮平均质量浓度分别为 14.76 mg/L 和 13.26 mg/L,经过投加 PPC 材质填料的 MBBR-AO 耦合工艺短期处理(24 d)后,出水中氨氮浓度显著下降,平均质量浓度仅为 5.32 mg/L 和 6.42 mg/L,氨氮平均去除量分别为 9.44 mg/L 和 6.84 mg/L,氨氮平均去除率分别为 63.96% 和 51.58%,表明 PPC 材质填料对雨污混流污水中氨氮的去除具有一定的效果。雨污混流污

水中的氨氮浓度较高,这可能是由于其他复杂的成分被引入到了污水中,从而抑制了 PPC 材质填料对雨污混流污水中氨氮的降解。相比 PE 材质填料,PPC 材质填料的孔隙更小且孔隙率更高^[13],雨污混流污水中的杂质和颗粒悬浮物可能会堵塞 PPC 材质填料的孔隙,使得填料内部出现结块现象,从而降低污水中氨氮的去除效果。同时,也有先前的研究发现,小于 1 mm 生物膜会导致填料内部的孔隙堵塞^[14]。虽然生物膜能够加速填料内部的堵塞,但不是主要因素。

MBBR-AO 耦合工艺短期运行过程中,PE 材质填料对雨污混流污水的平均氨氮去除率(泵站一为 95.71%,泵站二为 84.49%)略高于微污染河道水体(84.55%),而 PPC 材质填料对雨污混流污水的平

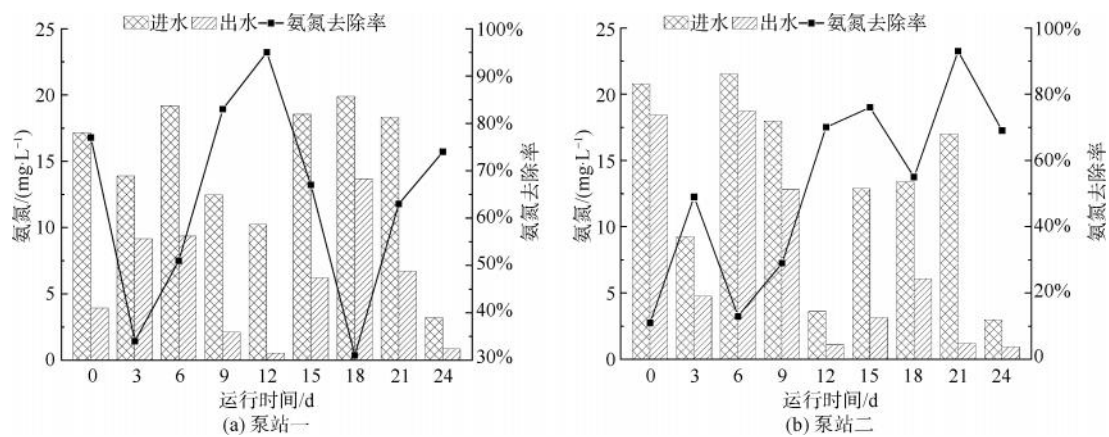


图5 污水处理装置短期运行过程中泵站雨污混流污水中氨氮浓度的变化(投加 PPC 填料)
Fig. 5 Changes of Ammonia Nitrogen Concentration of Combined Wastewater from Pumping Station during Short-Term Operation of Wastewater Treatment Equipment (with PPC Filler)

均氨氮去除率(泵站一为 63.96%, 泵站二为 51.58%)稍微低于微污染河道水体(75.52%)。就 PE 材质填料而言,相较于微污染河道水体,雨污混流污水中的低溶解氧浓度更有利于 PE 材质填料中微生物同步进行硝化和反硝化的脱氮反应^[15]。PPC 材质填料挂膜过程中会将污泥吸附至填料内部,导致溶解氧浓度上升,不利于其内部的微生物同步进行硝化和反硝化的脱氮反应,使得雨污混流污水和微污染河道水体中的氨氮去除率均下降。

综上所述,投加 PE 材质填料更有利于 MBBR-AO 耦合工艺短期内降解雨污混流污水中的氨氮。

2.2.3 工艺长期运行过程中 PE 和 PPC 降解雨污混流污水氨氮的效果

如图 6 所示,投加 PE 材质填料的 MBBR-AO 耦

合工艺长期(96 d)运行过程中泵站一[图 6(a)]和泵站二[图 6(b)]雨污混流污水的进水氨氮质量浓度分别为 2~25 mg/L 和 3~35 mg/L,波动范围较大,进水氨氮平均质量浓度分别为 10.20 mg/L 和 8.93 mg/L,污水经 MBBR-AO 耦合工艺处理后,出水中平均氨氮质量浓度降低至 2.93 mg/L 和 2.67 mg/L,氨氮平均去除量分别为 7.27 mg/L 和 6.26 mg/L,氨氮平均去除率分别为 71.27% 和 70.10%。在 MBBR-AO 耦合工艺长期(96 d)运行过程中投加 PE 材质填料对泵站一和泵站二雨污混流污水中氨氮的降解无显著差异,氨氮的去除率均维持在 74% 左右,表明在 MBBR-AO 耦合工艺长期(96 d)运行过程中投加 PE 材质填料对雨污混流污水中氨氮具有较好的去除效果。当投加 PE 材质填料的 MBBR-

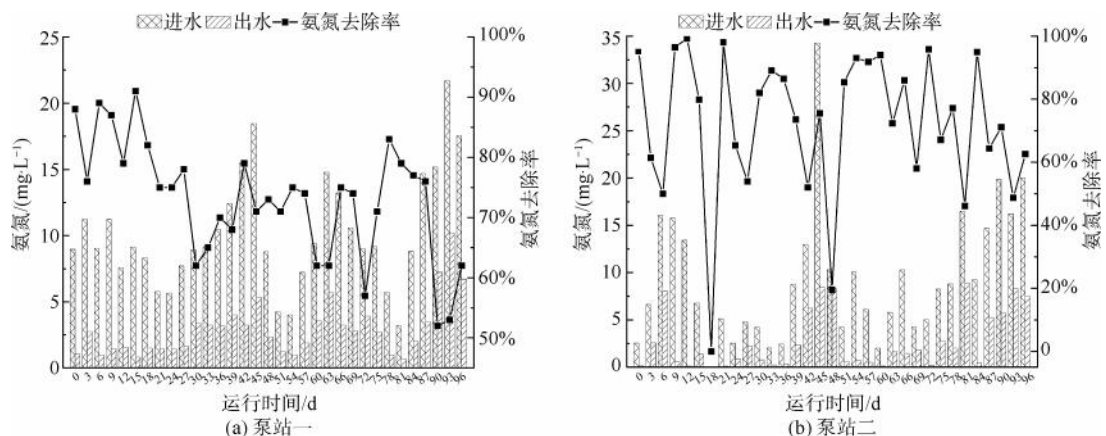


图6 污水处理装置长期运行过程中泵站雨污混流污水中氨氮浓度的变化(投加 PE 填料)
Fig. 6 Changes of Ammonia Nitrogen Concentration of Combined Wastewater from Pumping Station during Long-Term Operation of Wastewater Treatment Equipment (with PE Filler)

AO 耦合工艺运行至后期(84~96 d), 无论进水是泵站一还是泵站二雨污混流污水, 出水氨氮浓度显著升高, 氨氮去除率显著低于工艺运行前期接近 90% 的氨氮去除率。这是 PE 填料经过较长时间的使用后自身存在破损、老化等情况, 同时填料表面的粗糙度发生变化^[16], 导致使用强度和氨氮去除能力降低。

投加 PPC 材质填料的 MBBR-AO 耦合工艺长期运行过程中进水氨氮浓度、出水氨氮浓度、氨氮去除量、氨氮去除率变化如图 7 所示。泵站一[图 7(a)]和泵站二[图 7(b)]雨污混流污水的进水氨氮质量浓度为 3~35 mg/L, 进水氨氮的平均质量浓度分别为 10.96 mg/L 和 8.10 mg/L, 污水经 MBBR-AO 耦合工艺处理后, 出水氨氮的平均质量

浓度分别降低至 3.96 mg/L 和 3.39 mg/L, 氨氮的平均去除量为 7.00 mg/L 和 4.71 mg/L, 氨氮的平均去除率分别为 63.87% 和 58.15%。在 MBBR-AO 耦合工艺长期运行过程中投加 PPC 材质填料对泵站一雨污混流污水中氨氮的降解效果好于泵站二雨污混流污水, 但无明显差别, 表明在 MBBR-AO 耦合工艺长期运行过程中投加 PPC 材质填料对雨污混流污水中氨氮具有一定的去除效果。投加 PPC 材质填料的 MBBR-AO 耦合工艺长期运行氨氮的去除率相较于工艺短期运行反而有所升高, 这是由于 PPC 材质填料在长时间的运行过程中污泥堆积在填料内部, 形成局部厌氧或缺氧环境, 为硝化细菌的生命活动提供了适宜的生存环境, 硝化细菌迅速繁殖, 局部反应速率加快。

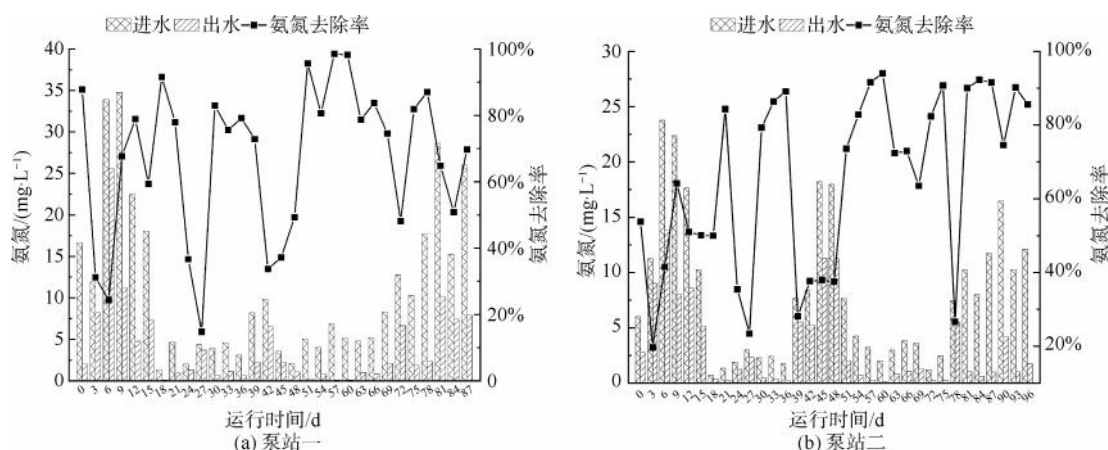


图 7 污水处理装置长期运行过程中泵站雨污混流污水中氨氮浓度的变化(投加 PPC 填料)

Fig. 7 Changes of Ammonia Nitrogen Concentration of Combined Wastewater from Pumping Station during Long-Term Operation of Wastewater Treatment Equipment (with PPC Filler)

综上所述, 投加 PE 材质填料更有利于 MBBR-AO 耦合工艺长期运行过程中降解雨污混流污水中的氨氮。同时, PE 材质填料长时间使用后应及时更换或清洗, 保证 MBBR-AO 耦合工艺长期运行过程中污水中的氨氮仍能被有效去除。

2.3 不同材质生物载体填料的使用寿命

相较于 PPC 材质填料, MBBR-AO 耦合工艺长期处理微污染河道水体和雨污混流污水的过程中, PE 材质填料具有更长的使用寿命。如图 8 (a) 所示, MBBR-AO 耦合工艺处理污水过程中 PPC 材质填料会发生掉渣和破损的问题, 同时长时间运行填料内部出现老化和结块现象[图 8 (b)、图 8 (c)]。PPC 材质填料的污泥流通性

差, 尽管海绵状的 PPC 填料比表面积较大, 但其内部孔隙容易吸附污泥而难以流出。污泥长时间堆积在填料内部, 易于形成厌氧或缺氧环境, 使得填料的颜色由褐色逐渐转变为黑色, 导致 PPC 填料在长时间运行过程中会出现掉渣、破碎、老化、结块等问题, 从而缩短其使用寿命。这也是 PPC 材质填料对于去除雨污混流污水中氨氮效果较差的主要因素[图 5 (a)、图 5 (b)]。而 PE 材质填料在 MBBR-AO 耦合工艺长期处理污水的过程中基本没有出现上述问题, 耐用程度更好, 使用寿命更长。合理的载体构型能够有效缓冲水流对生物膜的冲击, 生物膜在不受破坏的情况下稳定生长^[17]。

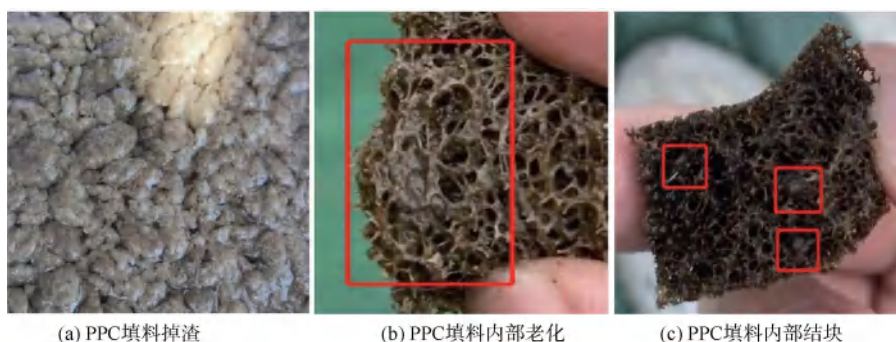


图8 PPC 填料破损

Fig. 8 PPC Filler Breakage

3 结论

文章在 MBBR-AO 耦合工艺污水处理过程中投加 PE 生物载体填料和 PPC 填料,探究了填料材质对微污染河道水体及雨污混流污水氨氮降解的影响以及不同材质填料的微生物挂膜速度和使用寿命。与 PPC 材质填料相比,PE 材质填料的挂膜速度慢,但其使用寿命更长。同时 PE 材质填料无论是用于 MBBR-AO 耦合工艺长期还是短期处理微污染河道水体和雨污混流污水,对氨氮均具有更好的降解效果。研究成果为污水处理过程中填料材质的选择提供技术支撑。

参考文献

[1] 卢德强, 张喜宝, 张家鸣, 等. MBBR 工艺在城市污水处理厂提标改造中的应用分析[J]. 环境工程, 2023, 41(s1): 23-26.
LU D Q, ZHANG X B, ZHANG J M, et al. Application and analysis of MBBR process in the upgrading of urban sewage treatment plant[J]. Environmental Engineering, 2023, 41(s1): 23-26.

[2] 张申旺, 杨硕, 张向阳, 等. 某污水处理厂 MSBR 工艺升级改造为 MBBR 工艺的工程应用[J]. 净水技术, 2023, 42(10): 173-178.
ZHANG S W, YANG S, ZHANG X Y, et al. Engineering application of upgrading MSBR process to MBBR process in a WWTP[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(10): 173-178.

[3] 梁一帆, 潘增锐, 喻盛华, 等. MBBR 污水生化处理系统中泥膜的生物群落分析[J]. 中国给水排水, 2023, 39(23): 15-22.
LIANG Y F, PAN Z R, YU S H, et al. Microbial community of sludge and biofilm in a moving bed biofilm reactor[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(23): 15-22.

[4] 仵晓辉, 刘真, 侯海明, 等. 西部高原某污水处理厂的

MBBR 改造效果分析[J]. 净水技术, 2023, 42(11): 166-172, 190.
WU X H, LIU Z, HOU H M, et al. Performance analysis of MBBR process reconstruction for a western plateau WWTP[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(11): 166-172, 190.

[5] MACHINENI L. Review on biological wastewater treatment and resources recovery: Attached and suspended growth systems[J]. Water Science and Technology, 2019, 80(11): 2013-2026.

[6] 苑泉, 王海燕, 刘凯, 等. 污水厂尾水 MBBR 反硝化深度脱氮填料比较[J]. 环境科学学报, 2015, 35(3): 713-721.
YUAN Q, WANG H Y, LIU K, et al. Comparison of the MBBR denitrification carriers for advanced nitrogen removal of wastewater treatment plant effluent [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(3): 713-721.

[7] 肖天宇, 王凯, 武道吉, 等. MBBR 填料及其改性方法研究进展[J]. 工业水处理, 2023, 43(3): 23-30.
XIAO T Y, WANG K, WU D J, et al. Research progress of MBBR filler and its modification methods[J]. Industrial Water Treatment, 2023, 43(3): 23-30.

[8] 唐俊杰. 一体式农村污水处理设备填料性能及抗生素去除研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022.
TANG J J. Study on packing performance and antibiotic removal of integrated rural sewage treatment equipment [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2022.

[9] WANG C, QIAO S, BI Z, et al. Nitrate removal by anammox biomass with intracellular carbon source as electron donors via DNRA pathway [J]. Environmental Research, 2021, 200: 111390. DOI: 10.1016/j.envres.2021.111390.

[10] 姚尚. 改性聚乙烯悬浮填料在移动床生物膜反应器中的应用[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2023.
YAO S. Application of modified polyethylene suspension packing in moving-bed biofilm reactor [D]. Hefei: Anhui Jianzu University, 2023.

[11] KOWALSKI M S, DEVLIN T R, OLESZKIEWICZ J A. Attachment of anaerobic ammonium-oxidizing bacteria to augmented carrier material [J]. Environmental Technology, 2019, 40(5): 576-583.

- [12] SKLENICKOVA K, PECENKA M, ŘIHOVA AMBROZOVA J, et al. Influence of biodegradable polyurethane foam on biocenosis and sludge activity in reactors simulating low-load wastewater treatments[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2021, 44: 102455. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.102455.
- [13] 黎镛. 微生物载体对 MBBR 工艺性能及微生物群落结构的影响研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2022.
- LI Y. Effects of microbial carriers on MBBR process performance and microbial community structure [D]. Changsha: Hunan University, 2022.
- [14] MAUCLAIRE L, SCHURMANN A, MERMILLOD-BLONDIN F. Influence of hydraulic conductivity on communities of microorganisms and invertebrates in porous media: A case study in drinking water slow sand filters[J]. 2006, 68, 100–108. DOI: 10.1007/s00027-005-0811-4.
- [15] 向钰. 不同溶解氧同步硝化反硝化脱氮效能及途径[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- XIANG Y. Nitrogen removal capacity and pathways of the simultaneous nitrification and denitrification process under different oxygen conditions [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.
- [16] 杨龙, 詹旭, 周恩华, 等. 改性 HDPE 填料的制备及对 MBBR 脱氮除磷效果的强化[J]. *环境工程学报*, 2023, 17(5): 1674–1682.
- YANG L, ZHAN X, ZHOU E H, et al. Preparation of modified HDPE carrier and its strengthening effect on nitrogen and phosphorus removal of MBBR [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2023, 17(5): 1674–1682.
- [17] 袁维芳, 邱仲业, 王浩, 等. MBBR 工艺原理、填料特性及工程化应用进展[J]. *轻工科技*, 2023, 39(2): 78–81.
- YUAN W F, QIU Z Y, WANG H, et al. MBBR process principle, filler characteristics and engineering application progress[J]. *Light Industry Science and Technology*, 2023, 39(2): 78–81.

(上接第 102 页)

- [11] LIU J, WANG P, JIANG D, et al. An integrated data-driven framework for surface water quality anomaly detection and early warning [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 251: 119145. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119145.
- [12] HANEMANN M, KANNINEN B. The statistical analysis of discrete-Response CV data [M]. Oxford: Oxford University Press, 2001.
- [13] HAN H G, ZHANG H J, LIU Z, et al. Data-driven decision-making for wastewater treatment process[J]. *Control Engineering Practice*, 2020, 96: 104305. DOI: 10.1016/j.conengprac.2020.104305.
- [14] 许华一, 李姗姗, 韦静, 等. 菌藻共生系统实现短程硝化工艺的藻供氧条件和影响因素分析[J]. *环境工程*, 2024, 42(5): 42–52.
- XU H Y, LI S W, WEI J, et al. Study on oxygen supply condition and influence of algal in partial nitrification process in a bacteria and algae symbiotic system [J]. *Environmental Engineering*, 2024, 42(5): 42–52.
- [15] 康军利. 人工湿地对二级出水中 TN、TP 去除效果的季节性研究[J]. *安全与环境学报*, 2012, 12(1): 40–44.
- KANG J L. Seasonal effects of the artificial wetlands on the removing of nitrogen and phosphorus content in secondary effluent [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2012, 12(1): 40–44.
- [16] 刘梅, 原居林, 倪蒙, 等. “三池两坝”多级组合工艺对内陆池塘养殖尾水的处理[J]. *环境工程技术学报*, 2021, 11(1): 97–106.
- LIU M, YUAN J L, NI M, et al. Treatment of inland pond aquaculture tail water by multi-stage combined process of “three ponds and two dams” [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021, 11(1): 97–106.
- [17] LIU M, LIAN Q, ZHAO Y, et al. Treatment effects of pond aquaculture wastewater using a field-scale combined ecological treatment system and the associated microbial characteristics[J]. *Aquaculture*, 2023, 563: 739018. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2022.739018.
- [18] WU B, RAN T, LIU S, et al. Biofilm bioactivity affects nitrogen metabolism in a push-flow microalgae-bacteria biofilm reactor during aeration-free greywater treatment [J]. *Water Research*, 2023, 244: 120461. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120461.