

吴桐,凌宇,王海燕,等. MBBR 填料研究与应用进展[J]. 环境工程技术学报,2020,10(6):988-995.

WU T, LING Y, WANG H Y, et al. Review on the research and application development of MBBR carrier[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2020, 10(6): 988-995.

# MBBR 填料研究与应用进展

吴桐<sup>1</sup>, 凌宇<sup>1</sup>, 王海燕<sup>1,2\*</sup>, 常洋<sup>1</sup>, 董伟羊<sup>1</sup>, 闫国凯<sup>1</sup>

1. 中国环境科学研究院环境污染控制工程技术研究中心

2. 环境基准与风险评估国家重点实验室, 中国环境科学研究院

**摘要** 移动床生物膜反应器(MBBR)是一种广泛用于各种污/废水处理的新型工艺,而填料是影响其处理效能的关键因素之一。综述了目前国内外 MBBR 中所用的不同材质、不同构型的常用填料及改性填料的研究与应用进展,并对不同种类填料上的微生物群落特征进行了分析,最后对 MBBR 填料未来的发展趋势进行了展望,认为经济耐用、具有各种污染物去除功能的新型填料是未来的发展方向。

**关键词** MBBR; 填料; 材质; 构型; 改性

中图分类号:X703 文章编号:1674-991X(2020)06-0988-08 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20190144

## Review on the research and application development of MBBR carrier

WU Tong<sup>1</sup>, LING Yu<sup>1</sup>, WANG Haiyan<sup>1,2\*</sup>, CHANG Yang<sup>1</sup>, DONG Weiyang<sup>1</sup>, YAN Guokai<sup>1</sup>

1. Engineering Center for Environmental Pollution Control, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

**Abstract** The moving bed biofilm reactor (MBBR) is a novel wastewater treatment process that has been widely used for all kinds of wastewater treatment, and the carrier is one of the key factors influencing the efficiency of MBBR. The research and application progress of the carriers with different material properties, the common fillers and modified fillers of different configurations used in MBBR at home and abroad were mainly reviewed, and the microbial communities characteristics of biofilm attached on different kinds of carriers were analyzed. Finally, the future development trend of carriers was put forward and it was considered that the development of the economic and durable carriers with various pollutants removal efficiency were the future development direction.

**Key words** MBBR; carriers; material properties; configurations; modified

填料在移动床生物膜反应器(moving bed biofilm reactor, MBBR)工艺中起着重要作用,能在一定程度上节省时间和能耗;运行过程中填料相互碰撞、摩擦,有助于提高生物活性,填料的多孔性有利于生物挂膜;填料的材质和结构会影响整个生物膜的形成和厚度,进而影响气液传质和处理效能。目前国内外使用的 MBBR 填料种类较多,按材质分主要有塑料、聚氨酯(PU)、陶粒和其他新型材质填料;按构型分主要有圆柱体、立方体、球状、短管状填料等。不同材质的填料特性差异较大,同材质不同构型的填料在各项参数上也存在差异,因此不同填料 MBBR 的水处理效能各不相同。MBBR 已被广泛应

用于生活污水、工业废水、垃圾渗滤液、医用废水等的处理,填料很大程度上决定 MBBR 的处理效果,因此对填料的研究至关重要。笔者综述了不同材质和构型 MBBR 填料的研究及应用现状,分析了不同填料上的微生物群落特征。

## 1 MBBR 常用填料

### 1.1 塑料填料

塑料填料是 MBBR 中最常用的填料材质之一,其密度一般为 0.96~1.00 kg/m<sup>3</sup>,具有比表面积大、强度高、寿命长和经济适用性强等优点,已被广泛应用于实际污水处理厂中,并取得了良好的处理效果。

收稿日期:2019-08-13 修回日期:2020-07-12

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07401-003-05);中央级公益性科研院所基本科研业务专项(2016YSKY-031)

作者简介:吴桐(1994—),女,硕士,主要从事水污染控制原理与技术研究,wutong9408@163.com

\* 责任作者:王海燕(1976—),女,研究员,博士,主要从事水污染控制原理与技术研究,wanghy@craes.org.cn

目前,市场上常见的商品化塑料填料主要有聚乙烯(polyethylene, PE)、聚丙烯(polypropylene, PP)和其他类型塑料填料,构型通常呈圆柱状、球状和短管状等。

### 1.1.1 PE 填料

PE 填料作为 MBBR 中最常见的填料之一,已被广泛用于处理生活污水<sup>[1]</sup>、餐饮废水<sup>[2]</sup>、工业废水<sup>[3]</sup>和垃圾渗滤液<sup>[4]</sup>等,以 PE 为填料的 MBBR 对污/废水中的色度、化学需氧量(COD)、氨氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )、总氮(TN)、硝氮( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ )、总有机碳(TOC)、 $\text{Mn}^{2+}$ 和挥发性酚类等物质具有良好的去除效果。

PE 填料可用于 MBBR 进行生活污水的处理。如贾丽萍等<sup>[1]</sup>在常温下采用填充率(FR)为 50%、规格为  $\varphi 10 \times 0.7$  mm 的短管型 PE 作为 MBBR 填料处理模拟农村生活污水,系统对 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 TP 平均去除率分别达 85%、85%、60% 和 70%。钱亮等<sup>[5]</sup>在西安市第四污水处理厂一期改造工程中,在原有厌氧-缺氧-好氧( $\text{A}^2/\text{O}$ )工艺的厌氧和缺氧区分别投加 FR 为 10%、规格为  $\varphi 25 \times 12$  mm 的裕隆-II 型和宇都 WD-F25 型 PE 圆柱状填料(表面呈波浪型、中心呈网状结构),出水水质能稳定达到 GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 标准。郭中伟等<sup>[6]</sup>在保定市银定庄污水处理厂原有缺氧-好氧(A/O)工艺好氧区投加规格为  $\varphi 25 \times 10$  mm 的高密度聚乙烯(high density polyethylene, HDPE)圆柱状填料,改造后的 MBBR 对 TN 去除率比之前提高约 30%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除率由 50% 提高至 80% 左右。Aygün 等<sup>[7]</sup>采用 Kaldnes K1 型 PE 填料,用有效体积为 2 L 的 MBBR 处理模拟生活污水,FR 为 50% 时,随着 MBBR 有机负荷从  $6 \text{ g}\cdot\text{m}^2/\text{d}$ (以 COD 计)增至  $96 \text{ g}\cdot\text{m}^2/\text{d}$ ,有机物去除率从 95.1% 降至 45.2%。Shore 等<sup>[8]</sup>采用 FR 为 50% 的 HDPE 为 MBBR 填料对模拟生活污水进行三级处理,在进水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度为 19 mg/L,温度分别为 35 和 40 °C 条件下, $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除率均可达 90% 以上。

PE 填料可用于 MBBR 进行餐饮废水的处理。如王丹丹等<sup>[2]</sup>采用  $\varphi 25 \times 12$  mm 柱状 PE 填料的 MBBR-膜生物反应器(MBR)工艺处理餐饮废水,其对 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TN 的去除率分别达 95%、94% 和 94%。

PE 填料可用于 MBBR 进行工业废水的处理。如 Su 等<sup>[3]</sup>采用  $\varphi 25 \times 10$  mm PE 填料的反硝化 MBBR 处理含  $\text{Mn}^{2+}$  废水,在进水  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度为 47.64 mg/L、水力停留时间(HRT)为 11.96 h、pH 为

5.21 时,系统对  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和  $\text{Mn}^{2+}$  的去除率最高,分别达 77.44% 和 61.28%。王钊等<sup>[9]</sup>采用  $\varphi 10 \times 10$  mm PE 填料的电解氧化和厌氧生物滤池-好氧 MBBR 组合工艺对维生素 C 企业的二级生化出水进行深度处理,出水 TOC、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度可分别降至 57.2、2.5 mg/L,平均去除率分别达 52%、84%。

PE 填料可用于 MBBR 进行垃圾渗滤液的处理。如叶杰旭等<sup>[4]</sup>采用  $\varphi 10 \times 12$  mm PE 填料的 MBBR-MBR 组合工艺处理垃圾渗滤液厌氧段出水,COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TN 平均去除率可达 80%、99% 和 81%,出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度小于 15 mg/L。徐晓晨等<sup>[10]</sup>采用  $\varphi 25 \times 12$  mm PE 填料的 MBBR 对亚硝化-厌氧氨氧化-反硝化工艺处理垃圾渗滤液厌氧段出水的脱氮效果进行了研究,在进水 TN 负荷为  $0.9 \text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$  时,TN 去除率仍可达 88%。

### 1.1.2 PP 填料

PP 填料多用于 MBBR 组合工艺中,如 MBBR 与 A/O 组合工艺<sup>[11]</sup>、MBBR-MBR 组合工艺<sup>[12]</sup>、升流式厌氧污泥床(UASB)-MBBR-绳状床生物膜反应器(rope bed biofilm reactor, RBBR)工艺<sup>[13]</sup>等,主要用来脱氮和去除有机物。如陈月芳等<sup>[11]</sup>将 MBBR 与传统 A/O 工艺结合处理农村生活污水,缺氧区和好氧区均采用高密度 K1 型 PP 填料,FR 为 50% 时,COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TN 平均去除率分别为 92.4%、93.8% 和 73.4%。余春菲<sup>[12]</sup>采用  $\varphi 25$  mm 球形 PP 填料的 MBBR 处理模拟生活污水,COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TP 去除率可达 80%、99.6% 和 50%。刘靖等<sup>[14]</sup>采用体积装填比为 40% 的升流式 PP 环填料 MBBR 处理人工模拟含氮污水,COD(约 500 mg/L)和 TN(浓度约 30 mg/L)的去除率分别为 73.8% 和 67.9%。Chatterjee 等<sup>[13]</sup>研究 UASB-MBBR-RBBR 工艺的脱氮和有机物去除效能,采用比表面积为  $400 \text{ m}^2/\text{m}^3$  的 PP 填料,在 FR 为 33.3%、有机负荷为  $2 \text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ (以 COD 计)时,COD 的去除率可达  $99\% \pm 1\%$ ,出水 COD 为  $(7 \pm 3) \text{ mg}/\text{L}$ ;在有机负荷为  $0.2 \text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ (以 TN 计)时,系统的 TN 去除率可达  $89\% \pm 8\%$ 。

### 1.1.3 其他塑料填料

聚氯乙烯(PVC)<sup>[15-16]</sup>、聚偏氟乙烯(PVDF)<sup>[17]</sup>等也可以作为填料应用于 MBBR 中。如沈阳市南小河污水处理厂采用 PVC 圆柱形填料 MBBR 处理食品加工区市政污水,在 FR 为 25%~30%、HRT 为 4.4 h 时,COD、悬浮颗粒物(SS)去除率均达 90% 以上<sup>[15]</sup>。Goswami 等<sup>[16]</sup>采用  $\varphi 12.5 \times 15$  mm 的 PVC 环作为 MBBR 填料处理制革废水,填料上的生物量

呈稳定增长状态, COD 去除率可达 85%~90%。王广智等<sup>[17]</sup>采用 FR 为 20% 的 PVDF 为好氧 MBBR 填料处理含吡啶废水, 在 HRT 为 8 h 时, 吡啶去除率达 100%, COD 去除率达 89.65%; 曝气量为 0.10~0.12 mL/min 时, COD 和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除率分别为 88.88%~92.95% 和 65.00%~66.83%。

PE 填料因具有经济效益高、处理效果好、在反应器内易处于悬浮状态等优点, 已被广泛应用于实际工程中; 多数 PP 填料因材质密度较轻、材料脆、使用寿命短等问题, 在实际工程中应用较少; PVC 和 PVDF 填料虽对一些污染物有较好的去除效能, 但与 PE 相比成本较高, 因此多用于工业废水的处理中。

### 1.2 聚氨酯(PU)泡沫填料

聚氨酯(polyurethane, PU)泡沫填料具有良好的机械强度和较高的孔隙率, 可为微生物提供较大的附着面积, 使其快速、稳定地生长, 能有效去除污水/废水中有机污染物和各种营养物, 其价格经济实惠, 能降低水处理成本, 是一种很有前景的 MBBR 水处理填料。

PU 泡沫作为填料时, MBBR 对低碳氮比(C/N)废水、有机废水和石油加工废水均有较好的有机物和氮污染物去除效果。如 Lim 等<sup>[18]</sup>采用 FR 为 40% 的 PU (2 cm × 2 cm × 2 cm) 泡沫填料的 MBBR 处理低 C/N 废水, TN 去除率可达 84%。Chu 等<sup>[19]</sup>采用 PU 填料处理低 C/N 污水, 在 HRT 为 14 h 时, MBBR 对水中 TOC 和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除率分别达 90% 和 65%。Feng 等<sup>[20]</sup>采用 PU 泡沫填料, 在 HRT 为 5 h、FR 为 40% 时, 好氧 MBBR 可以去除模拟生活污水中 80% 的 COD 和 96.3% 的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 。冀巍<sup>[21]</sup>采用 FR 为 25% 的大孔网状 PU 填料的 MBBR 处理低浓度硝基苯废水, 在 HRT 为 24 h, 硝基苯初始浓度为 2.09 mg/L 时, COD 去除率为 92.58%, 硝基苯去除率为 49.82%。

### 1.3 陶粒填料

陶粒是以黏土为主要生产原料的生物载体, 其外观多为圆形或椭圆形球体、不规则碎石状, 其表面粗糙呈蜂窝状, 可为微生物提供适宜附着、固定和生长的环境, 能吸附水体中的有害元素、细菌和矿化水质, 多于用生物滤池中, 但应用于 MBBR 的报道较少, 已有报道集中在处理模拟生活污水、生产和医院废水的研究。如周艾文等<sup>[22]</sup>采用规格为 8~10 mm、孔隙率为 40%~44%、密度为 600~700 kg/m<sup>3</sup> 的生物陶粒 MBBR 处理模拟生活污水, 发现最适溶解

氧(DO)浓度为 3 mg/L 左右时,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TN 去除率可达 81.45% 和 60.35%; 当进水最佳 C/N 为 10 左右时,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TN 去除率可达 81.65% 和 63.60%。Shokoohi 等<sup>[23]</sup>采用 FR 为 50% 的轻质陶粒作为 MBBR 填料处理医院废水, 在 HRT 为 42 h, 混合液悬浮固体浓度(MLSS)为 5 000 mg/L 时, 系统的 COD 去除率达 83%。Kavoosi 等<sup>[24]</sup>采用轻质陶粒 MBBR 处理甜菜厂生产废水, 当进水 COD 为 800~3 200 mg/L, HRT 为 12.16~24.00 h, 负荷为 1.766 kg/m<sup>2</sup> (以 COD 计) 时, 可去除 82% 的可溶性 COD。但陶粒的密度与水相差较大<sup>[25]</sup>, 作为 MBBR 填料存在一定的缺陷, 如易漂浮在 MBBR 混合液表面, 很难在 MBBR 中处于悬浮状态, 影响微生物的附着生长。

### 1.4 其他材质填料

除各种塑料、PU 泡沫填料、陶粒填料外, 近年来出现了许多新型 MBBR 填料, 如可生物降解聚合物<sup>[26]</sup>、自制无机活性多孔物质<sup>[27-28]</sup>、纤维合成材料<sup>[29]</sup>、芦竹<sup>[30]</sup>、丝瓜络<sup>[31]</sup>等, 均取得了良好的处理效果。可生物降解聚合物不仅是微生物的附着载体, 同时也能充当碳源。如 Chu 等<sup>[26]</sup>采用可生物降解聚合物聚己内酯(PCL)作为 MBBR 填料, 当 HRT 为 18.5 h 时, TN 平均去除率为 74.6%, 且在低 C/N 条件下实现了同步硝化和反硝化。如郑兰香等<sup>[27]</sup>将珍珠岩焙烧制成新型多孔无机填料用在 MBBR 中, 生物膜上  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  降解速率可达 32.1 mg/(g·h)。

混有无机活性粒子的 PE 也可作为 MBBR 填料, 如赵冬霞<sup>[28]</sup>采用该填料用厌氧膨胀颗粒污泥床(EGSB)-缺氧/好氧 MBBR- $\text{O}_3$  氧化-好氧 MBBR 组合工艺处理食品酵母发酵废水, 稳定运行后, 系统 COD 去除率为 80% 左右。也有将 2 种材质填料组合在一起的报道, 如徐斌等<sup>[29]</sup>采用软性纤维和弹性立体纤维制成捆绑式填料 MBBR 预处理黄浦江微污染水, 在温度为 24.9 °C, 进水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度为 3 mg/L, HRT 为 1 h 时,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除率可达 77.6%。Li 等<sup>[30]</sup>采用芦竹作为小试 MBBR 填料和碳源处理城市污水再生厂的反渗透浓水, FR 为 30%, 系统运行稳定后,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  去除率为 73.2% ± 19.5%,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  平均去除速率为 (8.10 ± 3.45) g/(m<sup>3</sup>·d)。刘晗<sup>[31]</sup>将丝瓜络制成填料, 投加到 MBBR 小试工艺中, 经生物挂膜培养, 生物量达 0.49 g/g, 在 HRT 为 4 h 时, COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TP 去除率分别达 82.95%、74.19% 和 65.78%。

### 1.5 不同材质填料的比较研究

不同材质 MBBR 填料对微生物的附着能力不同,许多学者比较了不同类型填料以筛选适用于不同污/废水的填料。如苑泉等<sup>[25]</sup>考察填料类型( $\varphi 25 \times 10$  mm 的 PE、 $\varphi 25$  mm 的球形 PP、 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 15$  mm 的 PU 泡沫、 $\varphi 5 \times 10$  mm 的陶粒)对反硝化 MBBR 处理城市污水厂尾水脱氮及有机物去除的影响,筛选出  $\varphi 25 \times 10$  mm 的 PE 效果最好。丁晶静<sup>[32]</sup>采用 MBBR 和 A<sup>2</sup>/O 组合工艺处理受污染的太湖水,PE 填料( $\varphi 25 \times 12$  mm,孔隙率为 85%,密度为  $0.90 \sim 0.95$  mg/L)对污染物的去除效果低于立方体 PU 泡沫填料(长、宽、高均为 20 mm,孔隙率为 65%,密度为  $0.70 \sim 0.75$  mg/L)。Maurer 等<sup>[33]</sup>分别比较以 PU 和 PE 为填料的 MBBR 的效能,结果表明 2 个反应器在反硝化效能、最大 COD 和氨氮去除率等方面差异不大,但 PU 能储存更多的基质。Chu 等<sup>[19]</sup>在低 C/N 下比较以 PU 和可生物降解的高分子材料 PCL 颗粒为填料的 MBBR 对生活污水中有机物和氮的去除效能,发现当 HRT 为 14 h 时,以 PU 为填料的 MBBR 的 TOC 和氨氮去除率(90%、65%)高于以 PCL 为填料的 MBBR(72%、56%),二者最高 TN 去除率分别为 42.60% 和 60.15%,以 PCL 为填料的 MBBR 的 TN 去除性能较优。

针对不同类型的污/废水,最适用的 MBBR 填料也不尽相同。与塑料相比,PU 填料具有多孔性,因而可以储存更多的微生物,但在采用反硝化 MBBR 处理实际城市污水厂尾水时,以 PE 为填料的 MBBR 效果较好;以 PU 为填料的 MBBR 对 TOC 和  $\text{NH}_4^+$ -N 去除效果优于可生物降解的高分子材料,但 TN 的去除效果不及可生物降解的高分子材料。因此在实际应用时,应对填料进行筛选与优化。

## 2 MBBR 改性填料

MBBR 填料多由有机高分子制成,其亲水性和生物亲和性影响微生物的附着和水处理效能,因此,对 MBBR 填料进行改性,提高其亲水性和生物亲和性成为近年来研究的热点。国内外诸多学者对填料的改性研究多集中在亲水改性、表面带电改性、磁效应和超声波改性<sup>[34]</sup>等方面。常用的方法有表面化学改性、等离子体表面处理法、表面物理包覆、表面接枝改性和机械改性等。

### 2.1 PE 改性填料

可以通过在 PE 材质中添加如糖类、淀粉、改性剂、微量元素和高分子材料等其他材质来提高挂膜

量,或者通过液相氧化、表面接枝等途径增加 PE 表面粗糙度,以更利于微生物附着。如安燕等<sup>[35]</sup>在普通 PE 填料中添加糖类、淀粉、羟基磷灰石、磁粉等物质,形成新型磁性聚乙烯填料(MPPE),经运行发现 MPPE 填料上微生物挂膜量比普通 PE 填料分别提高约 64% 和 34%。李亚峰等<sup>[36]</sup>将新型高分子改性 PE 作为 MBBR 填料,采用厌氧池-缺氧池-MBBR(AA-MBBR)系统处理生活污水,在 FR 为 30% 时,COD 和  $\text{NH}_4^+$ -N 去除率分别为 95.36% 和 98.39%。李莉等<sup>[37]</sup>采用商品化改性 PE 和液相氧化-水浴接枝丙烯酸改性 PE 作为反硝化 MBBR 填料处理城市污水生产高品质再生水产生的反渗透浓水,结果表明改性填料的脱氮效能最优。郭志涛等<sup>[38]</sup>采用添加改性剂和微量元素的 HDPE 作为两级好氧 MBBR 的填料处理低浓度化工废水,其与 HDPE 为填料的 MBBR 相比,COD 平均去除率提高了 11.6%。欧日浩等<sup>[39]</sup>采用液相化学氧化和明胶表面接枝法对 PE 进行改性,改性后填料表面粗糙度及亲水性基团占比显著提高。张旭等<sup>[40]</sup>采用化学氧化-铁离子覆盖和化学氧化-表面接枝 2 种方法对 PE 生物填料进行表面改性,改性后填料表面呈正电性且粗糙度增加,亲水性与生物亲和性增强,MBBR 挂膜时间分别缩短 37.5% 和 60.0%,挂膜量分别提高 54.8% 和 76.1%,COD 的去除率分别提高 10.63% 和 8.64%。

### 2.2 PU 泡沫改性填料

提高 PU 亲水性和表面粗糙度、增加挂膜量是改性的最终目的,通常可采用强氧化剂或在 PU 制备过程中添加其他化学物质来改善 PU 表面亲水性,进而提高水处理效能。如李彦锋等<sup>[41]</sup>采用重铬酸钾强氧化剂对 PU 进行氧化,通过接触角及扫描电镜发现 PU 泡沫表面亲水性、表面电荷分布和挂膜速度均显著提高。杜振峰等<sup>[42]</sup>采用化学氧化-铁离子覆盖改性普通 PU 泡沫,改性后填料表面粗糙度、亲水性、生物膜量及生物膜平均每天生长量都得到提高。王玉晓等<sup>[43]</sup>在聚氨酯泡沫制备过程中加入 N-甲基二乙醇胺,并对聚氨酯泡沫进行酸化处理后,得到亲水化改性 PU,将其用作 MBBR 填料处理城市污水, $\text{NH}_4^+$ -N 去除率可达 97%。李亚峰等<sup>[36]</sup>将 PU 在  $0.05 \text{ mol/L}$  的重铬酸钾溶液中浸泡 24 h 后,用自来水冲洗至无重铬酸钾橘红色,再用 5% 双氧水浸泡 48 h,用自来水冲洗干净,80 °C 抽真空烘干后,得到一种改性 PU,将其作为填料的 MBBR 系统对高浓度氨氮废水中的 COD 和  $\text{NH}_4^+$ -N 去除率可达 92.7% 和 96.43%。

### 2.3 PP 改性填料

PP 改性主要分为物理改性和化学改性。其中,物理改性是在 PP 基体中加入其他无机材料、有机材料、塑料橡胶或具有特殊功能的添加剂等,可分为填充改性、增强改性、共混改性和功能性改性;化学改性是指通过交联剂等进行交联,或通过接枝共聚,在 PP 大分子链中引入其他组分,常用的化学改性手段有共聚改性、交联改性和接枝改性。为提高改性效果,通常将物理和化学 2 种方法结合起来对 PP 进行改性。如杜慷慨<sup>[44]</sup>利用超声波促进丙烯酸接枝 PP,当超声波作用时间为 30 min、反应温度为 110 °C、过氧甲苯酰及丙烯酸的用量分别为 4% 和 15% 时,超声波能有效促进丙烯酸对 PP 固相接枝反应的进行且接枝率达到 6%。

### 2.4 其他改性填料

其他改性方法多为在基体中加入无机或有机组分,以增加填料表面粗糙度,提高挂膜量和水处理效能。如 Zhao 等<sup>[45]</sup>在 10.5 L 的 MBBR 反应器中同时投加密度为 0.95~0.99 g/cm<sup>3</sup>、比表面积为 400~500 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> 的球状 PE 填料和 140 g 经聚合氯化铝或聚合氯化铁改性的硅藻土(比表面积为 50~60 m<sup>2</sup>/g,粒径为 50~100 μm)共同作为 MBBR 填料处理市政污水,在 HRT 为 2.5 h 时,系统的 COD、TP、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和浊度最高去除率可达 88.5%、83.0%、92.3% 和 96.7%。Dong 等<sup>[46]</sup>采用经海泡石改性的陶粒作为 MBBR 填料处理油田废水,运行 190 d 后,出水可满足 GB 4287—92《纺织染整工业水污染物排放标准》。

## 3 MBBR 填料微生物群落特征

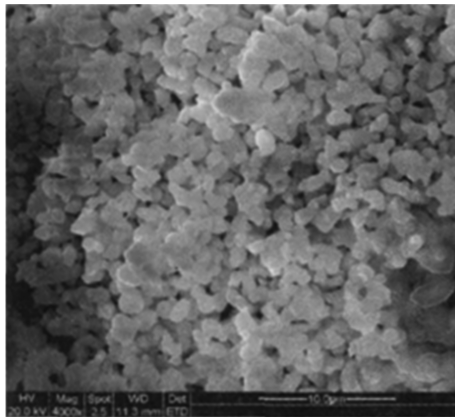
### 3.1 填料微生物群落特征

污水的生物处理主要依靠微生物新陈代谢作用降解水中污染物,在 MBBR 工艺中,填料为微生物生长提供了良好的载体,因此,分析填料上微生物特征,有助于深入判断工艺运行情况,采取相应措施提高水处理效能。众多研究表明,变形杆菌在填料上普遍存在,与好氧反应器相比,缺氧反应器中填料上微生物丰富度较低,多为反硝化菌、厌氧氨氧化菌和一些异养菌,好氧反应器中则多存在氨氧化菌、亚硝酸盐氧化菌、硝化细菌和其他自养菌。如齐勇等<sup>[47]</sup>在某污水处理厂原有 A<sup>2</sup>/O 工艺基础上,投加 30% PE 填料,稳定运行 6 个月,出水均能稳定达到 GB 18918—2002 一级 A 标准;扫描电镜观察到整个工艺沿污水流程形成不同的优势菌种(图 1),其中缺氧池中填料上主要为小球菌和变形杆菌,好氧池中

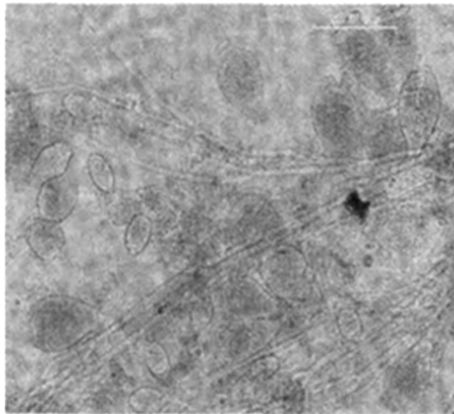
填料上除附着有各种异养菌(如氨化细菌、碳细菌)外,还有钟虫、线虫、草履虫等原生动物。Bassin 等<sup>[48]</sup>采用缺氧-好氧两级 MBBR 处理农药生产废水,采用 Kaldnes<sup>®</sup> K1 作为填料,经分析发现,缺氧、好氧反应器中主导菌属均为变形杆菌,在缺氧 MBBR 中物种多样性较低,以丝孢菌属(占 21%)为主;好氧 MBBR 以甲醇杆菌属(占 13%)为主,其次为硫杆菌属。Gustavsson 等<sup>[49]</sup>采用以 Kaldnes<sup>®</sup> K1 为填料的短程硝化-厌氧氨氧化 MBBR 处理市政污水,稳定运行后,生物膜上厌氧氨氧化菌丰富度最高,为 10%~30%,主要由布罗卡德氏菌(*Brocadia* sp.)和一些亚硝化单胞菌(*Nitrosomonas* sp.)构成;Song 等<sup>[50]</sup>采用 PU 为 MBBR 填料处理制药废水时,发现变形杆菌门(Proteobacteria)在生物膜上最为丰富,氨氧化菌(AOB)中含量最多的属为亚硝化单胞菌,其次为陶厄氏菌(*Thauera*)。Gao 等<sup>[51]</sup>采用经硝化细菌固定化的立方体凝胶聚合物(IMG)作为 MBBR 填料,处理循环水产养殖废水,当盐度从接近 0 升到 35.0 g/L 时,亚硝酸盐氧化菌(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)在 IMG 中的微生物活性下降 86.32%。亚硝化单胞菌和硝化螺旋菌(*Nitrospira* sp.)分别为 AOB 和 NOB 的主要菌属。Li 等<sup>[30]</sup>采用芦竹作为反硝化 MBBR 填料处理反渗透浓水,填料上排名前三的菌门为变形杆菌门、拟杆菌门(Bacteroidetes)和厚壁菌门(Firmicutes)。姚美辰等<sup>[52]</sup>采用变形梯度凝胶电泳(DGGE)分析 MBBR 生物膜微生物种群组成及多样性变化,结果显示,填料上优势菌种分别为变形菌门的陶厄氏菌、约氏不动杆菌。

### 3.2 不同类型填料微生物群落特征比较研究

不同类型填料上微生物种类一般存在差别,但均以反硝化菌、亚硝化细菌和厌氧氨氧化菌等为主,形态呈球状、杆状、丝状,部分填料上附着螺旋状细菌,改性填料上功能细菌数量和丰富度普遍高于未改性填料。如 Chu 等<sup>[19]</sup>采用 PU 和 PCL 作为 MBBR 填料处理模拟生活污水,SEM 观察显示,PCL 生物膜主要由球菌和杆菌组成,而 PU 生物膜上短杆状细菌和真菌较为丰富。苑泉等<sup>[25]</sup>采用 PE、PP、PU 泡沫体和陶粒作为 MBBR 填料处理城市污水厂尾水,稳定运行后,4 种填料上附着的微生物均以球菌、杆菌和丝状菌为主,PE 填料上的球菌最多;PP 填料上球菌、杆菌和丝状菌共生;PU 泡沫体填料上生物膜相对稀疏;陶粒上微生物较为分散,且黏性物质较多;PP 上的微生物最为丰富和致密。李亚峰等<sup>[36]</sup>采用新型高分子改性的 PE 和改性 PU 作为 AA-MBBR 填料



(a) 扫描电镜(SEM)



(b) 光学显微镜

图1 扫描电镜和光学显微镜下的微生物相<sup>[47]</sup>

Fig.1 Microbial phase under scanning electron microscope and optical microscope

处理生活污水,采用高通量分析生物膜结构,发现各反应池中微生物群落主要以硝化螺旋菌门、变形菌门为主,改性 PE 上存在亚硝化单胞菌。Lü 等<sup>[53]</sup>在 PP 外表面附着一定比例的沸石和聚氨酯泡沫制成新型填料,将其与 PP 分别作为短程硝化-厌氧氨氧化 MBBR 填料处理低浓度生活污水,16S RNA 分析显示,2 个反应器中优势菌门均为变形杆菌门和浮霉菌门,优势菌属均为亚硝化单胞菌和厌氧氨氧化菌,但新型填料上 AOB 和厌氧氨氧化菌更多。

#### 4 结论与展望

在诸多类型的填料中,PE 填料应用最广且效能最好,今后可将研究重点放在提高 PE 亲水性和生物亲和性上,可以通过添加微量物质,提高生物量和反应速率,进而提高 MBBR 工艺处理效率。另外,在处理低 C/N 废水时,需要外加碳源确保反硝化微生物必要的电子供体,未来研究应注重于开发既可作为生物载体又可以释放碳源的填料,简化操作流

程,在一定程度上节约处理成本。

国内外众多研究表明,采用常见填料的 MBBR 处理生活污水、工业废水、城市污水厂尾水等,均能取得良好的去除效果,但多数研究采用的是模拟污/废水,未来应尽量多采用实际污/废水作为处理对象,从而为实际工程提供理论依据和技术支撑。

#### 参考文献

- [1] 贾丽萍,姜彬慧,王一迪,等.生物移动床处理农村面源生活污水试验研究[J].环境工程,2016,34(4):16-19.  
JIA L P,JIANG B H,WANG Y D,et al. Treatment of rural non-point source domestic water by moving bed biofilm reactor[J]. Environmental Engineering,2016,34(4):16-19.
- [2] 王丹丹,罗清威.移动床-膜生物法餐饮废水深度处理[J].环境工程,2015,33(12):19-23.  
WANG D D,LUO Q W. Depth treatment of restaurant wastewater by moving bed biofilm-membrane process [J]. Environmental Engineering,2015,33(12):19-23.
- [3] SU J F,LUO X X,WEI L,et al. Performance and microbial communities of Mn(II)-based autotrophic denitrification in a moving bed biofilm reactor (MBBR) [J]. Bioresource Technology,2016,211:743-750.
- [4] 叶杰旭,穆永杰,孙德智,等.MBBR-MBR 组合工艺处理生活垃圾沥滤液的研究[J].工业水处理,2013,33(1):20-24.  
YE J X,MU Y J,SUN D Z,et al. Treatment of leachate from a domestic waste incineration plant by MBBR-MBR combined process[J]. Industrial Water Treatment,2013,33(1):20-24.
- [5] 钱亮,贺北平,刘瑞东,等.西安市第四污水处理厂一期工程升级改造经验总结[J].中国给水排水,2016,32(2):74-78.  
QIAN L,HE B P,LIU R D,et al. Summary of experience in upgrading and reconstruction of first stage project of Xi'an Fourth WWTP[J]. China Water & Wastewater,2016,32(2):74-78.
- [6] 郭中伟,史凯莹.MBBR 工艺在污水处理厂升级改造中的应用[J].中国环保产业,2016(10):66-68.  
GUO Z W,SHI K Y. Application of MBBR in upgrading reform of sewage treatment plants [J]. China Environmental Protection Industry,2016(10):66-68.
- [7] AYGUN A,NAS B,BERKAY A. Influence of high organic loading rates on COD removal and sludge production in moving bed biofilm reactor [J]. Environmental Engineering Science,2008,25:1311-1316.
- [8] SHORE J L,M'COY W S,GUNSCH C K,et al. Application of a moving bed biofilmreactor for tertiary ammonia treatment in high temperature industrial wastewater [J]. Bioresource Technology,2012,112:51-60.
- [9] 王钊,胡小兵,许柯,等.电解氧化-AF-MBBR 处理维生素 C 生产废水[J].中国环境科学,2011,31(11):1795-1801.  
WANG Z,HU X B,XU K,et al. Advanced treatment of vitamin C wastewater by electrolytic oxidation and AF-MBBR integrated reactor [J]. China Environmental Science,2011,31(11):1795-1801.
- [10] 徐晓晨,周亮,王超,等.SNAD-MBBR 处理垃圾渗滤液厌氧出

- 水的脱氮研究[J]. 中国给水排水, 2018, 34(23): 29-33.
- XU X C, ZHOU L, WANG C, et al. Nitrogen removal from anaerobic effluent of landfill leachate by SNAD-MBBR process [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(23): 29-33.
- [11] 陈月芳, 王岩, 安丹凤, 等. 组合移动床生物膜 (MBBR) 中溶解氧浓度和进水流量变化对除碳脱氮的影响[J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(4): 130-134.
- CHEN Y F, WANG Y, AN D F, et al. Effect of dissolved oxygen mass concentration and influent flow rate on removal of carbon and nitrogen in combined moving bed biofilm reactor[J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(4): 130-134.
- [12] 余春菲. 耦合生物膜系统中生物膜的粘附性能和微生物群落研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2016.
- [13] CHATTERJEE P, GHANGREKAR M M, RAO S. Organic matter and nitrogen removal in a hybrid upflow anaerobic sludge blanket-moving bed biofilm and rope bed biofilm reactor[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2016, 4(3): 3240-3245.
- [14] 刘靖, 万新南. MBBR 水气协同脱氮启动方法研究[J]. *广东微量元素科学*, 2007, 14(3): 23-27.
- LIU J, WAN X N. Experimental study on  $\text{NO}_x$ -process rapid start-up methods of MBBR [J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2007, 14(3): 23-27.
- [15] 赵斌, 刘瑾, 潘博, 等. MBBR 工艺处理食品加工区市政污水的工程应用[J]. *城市建设旬刊*, 2011(1): 114.
- [16] GOSWAMI S, MAZUMDER D. Comparative study between activated sludge process (ASP) and moving bed bioreactor (MBBR) for treating composite chrome tannery wastewater[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2016, 3(10): 3337-3342.
- [17] 王广智, 王敬元, 黄丽坤, 等. 好氧 MBBR 处理含喹啉废水的工艺优化试验研究[J]. *环境保护科学*, 2017, 43(2): 41-46.
- WANG G Z, WANG J Y, HUANG L K, et al. Experimental study of the process optimization of Indole-contained wastewater treatment by aerobic MBBR [J]. *Environmental Protection Science*, 2017, 43(2): 41-46.
- [18] LIM J W, SENG C E, LIM P E, et al. Nitrogen removal in moving bed sequencing batch reactor using polyurethane foam cubes of various sizes as carrier materials [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(21): 9876-9883.
- [19] CHU L, WANG J. Comparison of polyurethane foam and biodegradable polymer as carriers in moving bed biofilm reactor for treating wastewater with a low C/N ratio [J]. *Chemosphere*, 2011, 83(1): 63-68.
- [20] FENG Q, WANG Y, WANG T, et al. Effects of packing rates of cubic-shaped polyurethane foam carriers on the microbial community and the removal of organics and nitrogen in moving bed biofilm reactors [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 117: 201-207.
- [21] 冀巍. 大孔网状聚氨酯载体 MBBR 工艺处理低浓度硝基苯废水实验研究[J]. *环境科学与管理*, 2014, 39(6): 101-104.
- JI W. Study on treatment of low concentration nitrobenzene by MBBR process using large bore reticulated polyurethane carrier [J]. *Environmental Science and Management*, 2014, 39(6): 101-104.
- [22] 周艾文, 金腊华, 魏臻, 等. 生物陶粒 MBBR 同步硝化反硝化脱氮试验研究[J]. *工业用水与废水*, 2010, 41(5): 30-34.
- ZHOU A W, JIN L H, WEI Z, et al. Experimental research on nitrogen removal by simultaneous nitrification and denitrification in bio-ceramic filled MBBR [J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2010, 41(5): 30-34.
- [23] SHOKOOHI R, ASGARI G, LEILI M, et al. Efficiency of a bed biofilm reactor using a LECA carrier to treat hospital wastewater [J/OL]. *Avicenna Journal of Environmental Health Engineering*, 2016. doi:10.17795/ajehe-5330.
- [24] KAVOOSI A, BORGHEEI M. The use of light expanded clay aggregates as a biological support in wastewater treatment [J]. *Water and Wastewater*, 2005, 53: 37-47.
- [25] 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.
- [26] CHU L, WANG J. Nitrogen removal using biodegradable polymers as carbon source and biofilm carriers in a moving bed biofilm reactor [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 170(1): 220-225.
- [27] 郑兰香, 彭党聪. 反硝化 MBBR 中生物膜和悬浮微生物的特性[J]. *宁夏工程技术*, 2006, 5(1): 54-56.
- ZHENG L X, PENG D C. Characteristics of attached biomass and suspended biomass in a denitrifying MBBR [J]. *Ningxia Engineering Technology*, 2006, 5(1): 54-56.
- [28] 赵冬霞. 活性炭催化臭氧深度处理发酵废水与现场成套中试装置除污染效能研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [29] 徐斌, 夏四清, 胡晨燕, 等. MBBR 工艺预处理黄浦江微污染原水[J]. *中国给水排水*, 2004, 20(8): 5-9.
- XU B, XIA S Q, HU C Y, et al. MBBR technology for pretreatment of micro-polluted raw water in Huangpu River [J]. *China Water & Wastewater*, 2004, 20(8): 5-9.
- [30] LI L, YAN G K, WANG H Y, et al. Denitrification and microbial community in MBBR using *A. donax* as carbon source and biofilm carriers for reverse osmosis concentrate treatment [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, 84(10): 133-143.
- [31] 刘晗. 丝瓜络悬浮填料移动床处理生活废水研究[J]. *云南化工*, 2019(46): 51-55.
- LIU H. Study on treatment of domestic wastewater with mobile bed of loofah suspension packing [J]. *Yunnan Chemical Technology*, 2019(46): 51-55.
- [32] 丁晶静. 移动床生物膜反应器填料的选择及其处理低浓度废水的特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- [33] MAURER M, FUX C, GRAFF M, et al. Moving-bed biological treatment (MBBT) of municipal wastewater: denitrification [J]. *Water Science & Technology*, 2001, 43(11): 337-344.
- [34] 海景, 黄尚东, 程江, 等. 水处理用塑料生物膜载体改性研究进展[J]. *合成材料老化与应用*, 2006, 35(4): 41-45.
- HAI J, HUANG S D, CHENG J, et al. Advanced in modification of plastic biofilm carriers for biodegradation of wastewater [J]. *Synthetic Materials Aging and Application*, 2006, 35(4): 41-45.

- [35] 安燕,程江,杨卓如,等. 磁性聚乙烯填料对含酚废水好氧生物降解的影响[J]. 中国造纸,2007,26(7):19-22.  
AN Y, CHENG J, YANG Z R, et al. Influence of magnetic polyethylene packing on biological degradation of phenol wastewater in aerated process[J]. China Pulp & Paper,2007,26(7):19-22.
- [36] 李亚峰,李旭光,单连斌,等. 不同填料对 AA-MBBR 系统处理效果及菌群多样性影响[J]. 工业水处理,2019,39(1):73-77.  
LI Y F, LI X G, SHAN L B, et al. Influence of different fillers on the treatment effect and flora diversity of AA-MBBR system[J]. Industrial Water Treatment,2019,39(1):73-77.
- [37] 李莉,王海燕,吴桐,等. 反渗透浓水反硝化 MBBR 深度脱氮填料比较研究[C]//2018 中国环境科学学会科学技术年会论文集(第二卷). 北京:中国环境科学学会,2018.
- [38] 郭志涛,任洪强,丁丽丽. 改性填料对移动床生物膜反应器性能的影响[J]. 化工环保,2010(6):473-476.  
GUO Z T, REN H Q, DING L L. Influence of modified carriers on moving bed biofilm reactor [J]. Environmental Protection of Chemical Industry,2010(6):473-476.
- [39] 欧日浩,何德文,周康根,等. 移动床生物膜反应器用聚乙烯填料的改性研究[J]. 湖南师范大学自然科学学报,2019,42(2):69-74.  
OU R H, HE D W, ZHOU K G, et al. Modification of polyethylene biocarrier for moving-bed biofilm reactor[J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University,2019,42(2):69-74.
- [40] 张旭,李媛,柏丽梅,等. 废水处理用聚乙烯生物填料表面改性与表征研究[J]. 环境工程学报,2010,4(5):3-8.  
ZHANG X, LI Y, BAI L M, et al. Surface modification and characterization of polyethylene bio-carrier for wastewater treatment [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2010,4(5):3-8.
- [41] 李彦锋,赵光辉,马鹏程,等. 改性载体固定化微生物处理高氨氮废水的研究[J]. 安徽农业科学,2008,36(7):2877-2879.  
LI Y F, ZHAO G H, MA P C, et al. Study on wastewater containing strong ammonium by immobilized microorganism of modified carrier[J]. Journal of Anhui Agricultural Science,2008,36(7):2877-2879.
- [42] 杜振峰,王芬,成国栋,等. 化学氧化-铁离子覆盖改性聚氨酯泡沫塑料填料的特性[J]. 化工进展,2012,31(7):1575-1580.  
DU Z F, WANG F, CHENG G D, et al. Characteristics of polyurethane (PU) foam plastics bio-carrier modified by chemical oxidation-surface covering with iron ion[J]. Chemical Industry and Engineering Process,2012,31(7):1575-1580.
- [43] 王玉晓,孔秀琴,冯权,等. 以亲水化改性聚氨酯为多孔载体的生物膜移动床反应器处理污水中试研究[J]. 环境科学,2012,33(10):3489-3494.  
WANG Y X, KONG X Q, FENG Q, et al. Pilot-scale study on treatment of municipal sewage by moving-bed biofilm reactor with the hydrophobically modified polyurethane cubes as biofilm carriers[J]. Environmental Science,2012,33(10):3489-3494.
- [44] 杜慷慨. 超声波在丙烯酸固相接枝聚丙烯中的应用[J]. 合成树脂及塑料,2002,19(2):1-3.  
DU K K. The application of ultrasound in the research of acrylic acid solid phase grafting polypropylene [J]. China Synthetic Resins and Plastics,2002,19(2):1-3.
- [45] ZHAO Y, CAO D, LIU L, et al. Municipal wastewater treatment by moving-bed-biofilm reactor with diatomaceous earth as carriers [J]. Water Environment Research,2006,78(4):392-396.
- [46] DONG Z, LU M, HUANG W, et al. Treatment of oilfield wastewater in moving bed biofilm reactors using a novel suspended ceramic biocarrier[J]. Journal of Hazardous Materials,2011,196:123-130.
- [47] 齐勇,陶涛,吴韵瑕,等. MBBR 应用于污水处理厂提标改造中试研究[J]. 给水排水,2011,37(11):132-135.  
QI Y, TAO T, WU Y X, et al. Pilot study on MBBR application in upgrading of sewage treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering,2011,37(11):132-135.
- [48] BASSIN J P, RACHID C T C C, VILELA C, et al. Revealing the bacterial profile of an anoxic-aerobic moving-bed biofilm reactor system treating a chemical industry wastewater [J]. International Biodeterioration & Biodegradation,2017,120:152-160.
- [49] GUSTAVSSON D J I, SUAREZ C, WILÉN B M, et al. Long-term stability of partial nitrification-anammox for treatment of municipal wastewater in a moving bed biofilm reactor pilot system [J]. Science of the Total Environment,2020,74:136342.
- [50] SONG Z, ZHANG X B, SUN F Y, et al. Specific microbial diversity and functional gene (AOB amoA) analysis of a sponge-based aerobic nitrifying moving bed biofilm reactor exposed to typical pharmaceuticals [J]. Science of the Total Environment,2020,742:140660.
- [51] GAO Y, WANG X, LI J, et al. Effect of aquaculture salinity on nitrification and microbial community in moving bed bioreactors with immobilized microbial granules[J]. Bioresource Technology,2020,297:122427.
- [52] 姚美辰,段亮,张恒亮,等. MBBR-MBR 组合工艺处理生活污水试验中微生物种群结构的演变[J]. 环境工程技术学报,2019,9(3):252-260.  
YAO M C, DUAN L, ZHANG H L, et al. Microbial community structure and succession of MBBR-MBR combined process for domestic wastewater treatment [J]. Journal of Environmental Engineering Technology,2019,9(3):252-260.
- [53] LÜ Y F, PAN J J, HUO T R, et al. Enhanced microbial metabolism in one stage partial nitrification-anammox system treating low strength wastewater by novel composite carrier[J]. Water Research,2019,163:114872. ◇