



SBR 工艺处理高浓度废机油加工回收废水的试验研究

王 宁^{1,2}, 边德军¹, 赵乐欣¹, 莫文锋², 聂泽兵³, 艾胜书¹

(1. 长春工程学院吉林省城市污水处理重点实验室, 吉林长春 130012;

2. 杭州市城乡建设设计院股份有限公司, 浙江杭州 310000;

3. 东北师范大学吉林省城市污水处理与水质保障科技创新中心, 吉林长春 130117)

[摘要] 针对 COD 高达 2×10^5 mg/L 的 4S 店汽车发动机废机油加工回收废水, 试验采用不同方式稀释废水研究其生化处理效果。4 种稀释方式分别为自来水稀释、实验室 SBR 生化池出水稀释、本反应器出水 50% 回用稀释、本反应器出水 75% 回用稀释。结果表明, 实验室 SBR 生化池出水稀释方式能稳定且有效地降解这种难处理的机油废水, COD、 NH_4^+-N 、TN 平均去除率分别为 96.54%、88.72%、79.53%。同时, 实验室 SBR 生化池出水稀释方式的微生物菌群中利于脱氮的 α -Proteobacteria 纲和促进 EPS 分泌的 *Candidatus-Competibacter* 属丰度高于其他 3 种方式, 表明生化出水稀释的方式在一定程度上可改善机油废水的生化降解特性, 使其能够通过 SBR 工艺进行生化处理, 且处理成本低廉, 易于实现。试验结果为废机油加工回收废水的处理提供了一条可行的生化处理途径。

[关键词] 机油废水; 难降解有机物; SBR 工艺; 污泥特性; 微生物菌群

[中图分类号] X703 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)02-0095-09

Experimental study on the treatment of high concentration waste oil processing wastewater by SBR process

WANG Ning^{1,2}, BIAN Dejun¹, ZHAO Lexin¹, MO Wenfeng², NIE Zebing³, AI Shengshu¹

(1. Jilin Provincial Key Laboratory of Municipal Wastewater Treatment,

Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China;

2. Hangzhou Urban & Rural Construction Design Institute Co., Ltd., Hangzhou 310000, China;

3. Science and Technology Innovation Center for Municipal Wastewater Treatment and Water Quality Protection, Northeast Normal University, Changchun 130117, China)

Abstract: Aiming at the recovery wastewater from automobile engine waste oil processing in 4S store with COD up to 2×10^5 mg/L, different dilution methods were used to study the biochemical treatment effect. The four dilution ways included tap water dilution, laboratory SBR biochemical pool water dilution, the reactor water 50% reuse dilution, and the reactor water 75% reuse dilution. The results showed that the effluent dilution method of laboratory SBR biochemical tank could stably and effectively degrade the oil wastewater which was difficult to treat, and the average removal rates of COD, NH_4^+-N and TN were 96.54%, 88.72% and 79.53%, respectively. Meanwhile, the abundance of α -Proteobacteria which was beneficial to nitrogen removal and *Candidatus-Competibacter* which promoted EPS secretion in the effluent dilution method of SBR biochemical pool in the laboratory was higher than that of the other three methods, indicating that dilution of biochemical effluent could improve the biodegradation characteristics of motor oil wastewater to a certain extent, enabling it to be biochemical treated by SBR process. And the processing cost was low and easy to implement. The experimental results provided a feasible biochemical treatment way for the treatment of waste oil recovery wastewater.

Key words: oil wastewater; refractory organic matter; SBR process; sludge characteristics; microbial flora

润滑油在发动机润滑过程中会发生变质,一段时间后,润滑性能降低到一定程度就必须换油,润滑油更换会产生大量废液压油、齿轮油以及洗涤机件的污秽油等。据测算,目前我国各类工程机械设备、汽车、船舶和飞机火车等大型机械每年产生的废机油达2 500~3 000万t,废机油的处理方法主要有丢弃、焚烧和回收利用^[1]。随着国家对环保的越发重视,废机油经适当工艺处理成为再生润滑油的处理方法被广泛应用。但废机油在加工时会产生大量残留废水,这些废水多数含难降解有机物,成分较复杂,包括高沸点、高分子质量烃类和羟基酸、胶质、沥青质等非烃类混合物的化学成分,以及磨损产生的金属屑及其他磨粒等杂质和相关添加剂的非化学成分^[2]。本试验用水来自4S店汽车发动机废机油加工回收产生的废水,COD高达 2×10^5 mg/L。其经过自来水稀释后大部分以分散态的形式存在,不稳定,静置一段时间后会形成浮油^[3],挥发量仅为1.33%~1.67%。

生物法具有成本低、工艺简单、无害化降解等优点^[4],被广泛应用于污水处理技术中。目前利用生物法处理这种废水的研究鲜有报道。本试验采用不同方式稀释废水并利用SBR工艺在长污泥龄(SRT)、高污泥浓度(MLSS)下进行处理研究。SBR工艺可利用高的循环率有效稀释进水中高浓度难降解污染物,对极端条件具有较强的耐受性^[5],加之操作灵活的特点,有利于微生物对难降解污染物的去除^[6]。长SRT有利于硝化菌的生长^[7],高MLSS意味着能够产生更大粒径的活性污泥,可提高系统抗冲击负荷能力,同时为进行同步硝化反硝化创造条件^[8]。本试验的目的是探究出一种不仅节约成本,还可有效降解废机油加工回收废水的生物处理方法,以期为实际工程应用提供依据。

1 材料与方法

采用4组有效容积为1.2 L的柱形有机玻璃容器($D=60$ mm, $H=500$ mm)进行试验研究,分别命名为SBR-1、SBR-2、SBR-3、SBR-4。曝气装置为穿孔曝气管,通过空气压缩机进行曝气,利用转子流量计控制曝气量为80 mL/min。通过调节室温控制进水温度为 (19 ± 1) °C,试验装置如图1所示。

1.1 运行方式

SBR运行周期为12 h,由进水、10 h非限制性曝

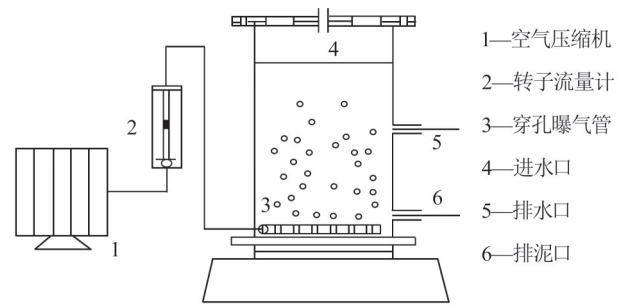


图1 SBR系统试验装置

Fig. 1 SBR system test equipment

气、2 h沉淀闲置、排水组成。1 d运行2个周期。排水比为20%。试验控制SRT为120 d,每10 d排100 mL污泥混合液用于指标检测。

1.2 试验污泥及水质

试验接种污泥取自长春市某污水处理厂。活性污泥在试验运行前经过了20 d污泥驯化。接种污泥初始MLSS为14 g/L左右。

废水中污染物浓度较高,COD高达 2×10^5 mg/L, TN为4 000 mg/L, NH_4^+-N 为3 000 mg/L。过高浓度的污染物不利于微生物的生存,为降低污染物浓度,试验将废水稀释100倍。废水中磷质量浓度较低(稀释后 <0.5 mg/L),不作为分析指标。稀释后的进水水质见表1。

表1 进水水质

Table 1 Inlet water quality

水质指标	范围	平均值
COD/(mg·L ⁻¹)	1 975~2 075	2 025
TN/(mg·L ⁻¹)	36.5~44.5	40.5
$\text{NH}_4^+-\text{N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	27~34	30.5
pH	7.7~8.6	8.15

1.3 反应器进水稀释方式

采用4组SBR反应器进行对比试验,根据数据分析比选出最优稀释方式。每组反应器进水量约为500 mL/d,每次配置4 d的进水量,每次每组反应器配制进水2 L。4组反应器配水方式见表2。

表2 反应器机油废水配水方式

Table 2 Water distribution scheme for oil wastewater in reactor

反应器	机油废水/mL	自来水/mL	生化池出水/mL	本反应器出水回用/mL
SBR-1	20	1 980	—	—
SBR-2	20	—	1 980	—
SBR-3	20	—	1 000	980
SBR-4	20	—	500	1 480

其中,SBR-3和SBR-4的出水回用于各自反应

器配水, SBR-3回用比为50%, SBR-4回用比为75%。SBR生化池出水取自实验室运行的母反应器, 母反应器有效容积为40 L, 日处理水量32 L, 平均进水COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN分别为436、29、45 mg/L, 平均出水COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN分别为24.7、0.49、6.99 mg/L。

1.4 检测项目及方法

本试验所用药品均为分析纯。COD、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、MLSS按照标准法检测^[9]; 胞外聚合物(EPS)采用加热法提取, 多糖(PS)和蛋白质(PN)的测定分别采用蒽酮硫酸比色法^[10]和考马斯亮蓝法^[11], 二者之和记为EPS总量; 脱氢酶活性(DHA)采用1, 3, 5-氯化三苯基四氮唑(TTC)还原法测定^[12]; 生物相镜检采用莱卡正置荧光显微镜(LEICA DM5000 B)观察; 微生物菌群结构通过16S rRNA技术分析; pH使用PHSJ-4A酸度仪检测; 温度使用温度计测量。

2 结果与讨论

2.1 污染物去除效果分析

2.1.1 COD的去除

各反应器稀释后的进水COD为2 000 mg/L左右, COD去除情况见图2。

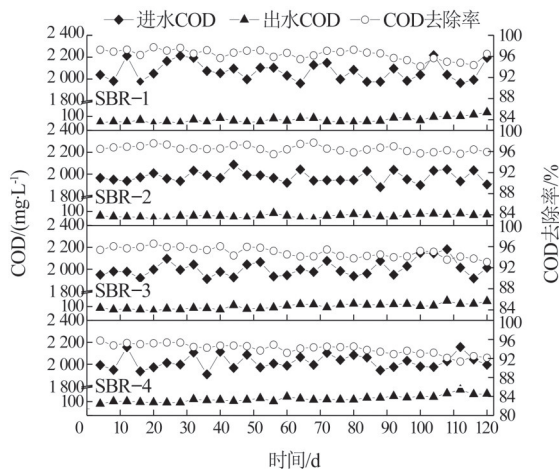


图2 各反应器对COD的去除效果

Fig. 2 Removal effect of COD in each reactor

从图2中出水数据对比看, SBR-2处理效果最佳。各反应器在运行0~60 d期间, 出水COD波动均不大。有研究表明, 高MLSS能有效降低污泥负荷, 增强处理效果^[13-14]。此外, 污泥吸附对COD的去除也有一定贡献^[15]。因此, 各反应器COD处理效果较好。各反应器在运行60~120 d期间, 出水COD均有所升高。SBR-1出水COD升高明显, 由第60天时的

67.72 mg/L升至第120天时的129.4 mg/L, 同时污泥有轻微膨胀现象。原因是高浓度的难降解有机物对微生物的生长产生了抑制, 系统对COD的去除率降低, 出水变差。SBR-2运行一直较稳定, 平均出水COD为71.6 mg/L, 实验室SBR生化池出水中微生物的存在, 丰富了反应器系统中微生物的菌群结构, 多菌群协同作用一定程度上改善了生化降解特性, 增强了系统的代谢能力, 系统形成了能稳定降解此种难降解有机物的菌群, 处理效果最佳。SBR-3、SBR-4出水COD分别由第60天时的106.8、135.4 mg/L升至第120天时的139.5、156.5 mg/L, 这是由于回用水中难降解有机物不断累积, 逐步对微生物产生抑制甚至毒害作用。SBR-4比SBR-3的出水COD高, 表明增加的25%回用水中难降解有机物的更多累积会降低系统对COD的去除率。

2.1.2 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与TN的去除

各反应器稀释后的进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN分别在30、40 mg/L左右, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN的去除情况见图3。

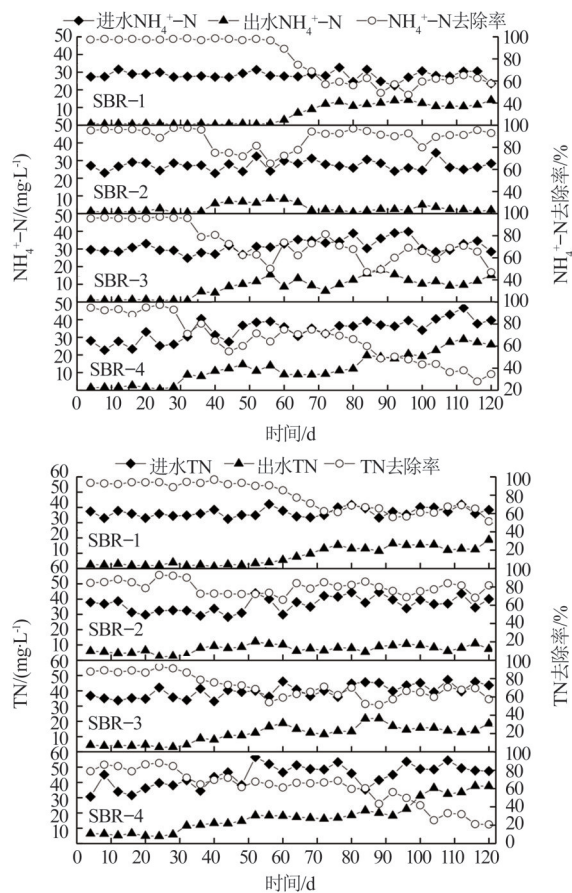


图3 各反应器对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN的去除效果

Fig. 3 Removal effect of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TN in each reactor

由图3可知, SBR-2脱氮效果最佳。由于接种污泥性质良好, 各反应器运行前30 d, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN的去除效果均良好, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率均能达到92%以上, TN的去除率在85%左右。较长的SRT保证了硝化菌和反硝化菌的数量, 提高了脱氮效果^[16], 同时高MLSS降低了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN的负荷, 有利于氮的去除。运行30 d后, SBR-3、SBR-4出水的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN均呈上升趋势, 60 d后SBR-1出水的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN也呈上升趋势。3组反应器运行至第120天时, SBR-1的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率降至57.7%, TN去除率降至51.4%; SBR-3的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率降至46.9%, TN去除率降至57.5%; SBR-4的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率仅为34.6%, TN去除率仅为20.8%。3组反应器对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN的去除效果均变差。这主要是机油废水中难降解有机物的累积对硝化菌产生抑制甚至毒害作用, 硝化反应受到抑制, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 未能转化成 $\text{NO}_x^-\text{-N}$, 硝化能力成为系统脱氮的限制条件。SBR-4对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN的去除率比SBR-3低, 进一步证实了回用水中难降解有机物的累积增多对系统脱氮产生了不利影响。同时SBR-3、SBR-4运行至后期, 系统出水浊度较高, 呈现明显的淡黄色。反观SBR-2的出水, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN呈现先上升后降低至最后稳定的趋势, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN的平均去除率分别为88.72%、79.53%, SBR-2系统有稳定的脱氮效果。试验表明生化池出水在一定程度上改善了系统微生物生化降解特性, 增强了系统对这种难处理废水的去除能力。

2.2 污泥特性的分析

2.2.1 MLSS、MLVSS及SVI变化情况

各反应器运行以SRT控制排泥量, 系统中MLSS、MLVSS及SVI变化情况见图4。

由图4(a)可知, 各反应器的MLSS均呈持续下降至稳定趋势。SBR-1、SBR-2、SBR-3、SBR-4的MLSS分别由13.9、13.7、13.9、13.4 g/L逐步稳定在10.4、9.7、9.9、10.8 g/L左右。机油废水成分复杂, 微生物不能较好地适应环境, 系统内微生物增殖量小于其排泥量, MLSS呈下降趋势, 50 d后实现稳定, 此时系统内形成能稳定降解机油废水的优势菌群, 微生物增殖速度缓慢。MLVSS/MLSS整体呈现先上升再稳定的趋势, 最终稳定在0.8左右。由图4(b)可知, 运行期间各反应器SVI整体均呈现上升趋势。SBR-1、SBR-2、SBR-3、SBR-4的SVI分别由63、61、

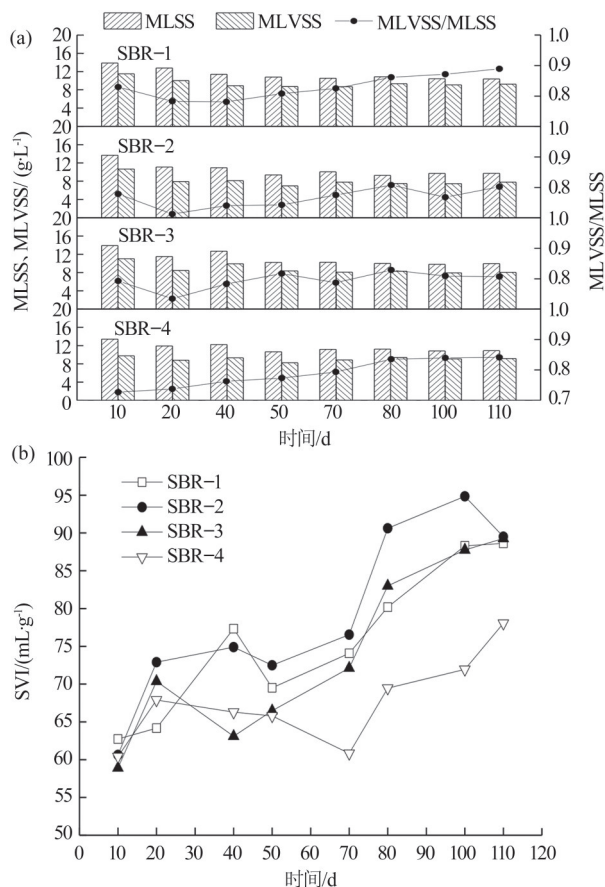


图4 各反应器MLSS、MLVSS(a)和SVI(b)变化情况

Fig. 4 Changes of MLSS, MLVSS (a) and SVI (b) in each reactor

59、60 mL/g上升至89、90、89、78 mL/g。活性污泥中有机质相对较高, 无机质较少, 不利于污泥沉降, 从而导致SVI上升。4组反应器的SVI整体上呈现SBR-2>SBR-1>SBR-3>SBR-4, 表明机油废水中难降解有机物的累积有利于污泥的沉降, 但不利于微生物的生存。SBR-2中由于微生物的代谢能力强于其他3组反应器, 难降解有机物累积较少, SVI高于其他3组反应器。在连续运行120 d内, 各反应器污泥沉降性能均表现出良好的状态, 且镜检未发现引起污泥膨胀的菌的存在, 表明SBR工艺对处理这种废水具有一定的适用性。

2.2.2 胞外聚合物(EPS)

胞外聚合物(EPS)是由微生物分泌的一些高分子聚合物, 主要包括多糖(PS)和蛋白质(PN), 约占有机物总量的70%~80%^[17], 是细菌在一定条件下形成的用于相互黏附^[18]、并在饥饿环境下为细菌提供碳源和能量的有机物质^[19], 且能够在细胞外面构

建抵御有毒有害物质的保护膜^[20]。EPS的含量和组成直接影响活性污泥对水中污染物的吸附去除、污泥絮凝沉降性能^[21],它的存在可减少废水中有害物

质对活性污泥中功能菌的潜在毒性^[6]。表3为运行120 d期间各反应器中胞外聚合物、蛋白质、多糖的变化情况。

表3 各反应器中蛋白质、多糖、胞外聚合物组分变化

Table 3 Changes of PN, PS and EPS in each reactor

运行时间	SBR-1			SBR-2			SBR-3			SBR-4		
	PN	PS	EPS	PN	PS	EPS	PN	PS	EPS	PN	PS	EPS
30 d	49.30	13.70	63.00	36.78	10.34	47.12	35.27	8.24	43.51	33.73	9.47	43.20
60 d	44.83	11.91	56.74	47.13	11.51	58.64	39.47	11.27	50.74	42.04	11.10	53.14
90 d	40.85	13.01	53.86	44.87	9.54	54.41	38.37	11.58	49.95	39.37	10.98	50.35
120 d	28.63	12.78	41.41	42.68	12.63	55.31	34.90	13.75	48.65	40.64	12.85	53.49

注:单位为mg/g,以VSS计。

由表3可知,SBR-1中EPS从63.00 mg/g持续减少至41.41 mg/g,其中PN不断减少,而PS变化较小。难降解有机物的抑制作用影响了微生物的正常代谢活动,微生物量及活性不断下降,导致微生物分泌的EPS不断减少。SBR-3、SBR-4中EPS变化幅度相对较小,系统运行60 d时,SBR-4中PN高于SBR-3,导致SBR-4中EPS相对较高。李珊珊等^[5]研究发现,较多的PN分泌可降低有害物质对微生物的毒害作用。SBR-4增加的25%回用水使难降解有机物累积更多,毒害作用更大,刺激微生物分泌更多的EPS来自我保护。同时,机油废水中有害物质对微生物进行了特异性筛选,适应该环境的微生物得以生存,但脱氮功能菌被逐渐淘汰,这也是2组反应器后期脱氮效果差的原因。SBR-4的脱氮效果比SBR-3更差也证实了这一点。SBR-2中EPS比其他3组反应器高,这是因为生化池出水含有的微生物与反应器活性污泥中微生物共同增强了系统代谢能力,系统中有害物质刺激微生物分泌更多EPS。EPS的增加可以有效抵御有毒有害物质对微生物的毒害作用^[22],保护系统微生物环境的平衡,这也是SBR-2比其他3组反应器污染物去除率高且稳定的原因。

2.2.3 脱氢酶活性(DHA)

活性污泥脱氢酶是微生物的一种胞内酶,参与有机物到分子氧化的电子得失的整个过程^[23],很大程度上反映了生物体的活性,间接反映了活性污泥的强弱^[24]。图5为4组反应器对微生物脱氢酶活性(DHA)的影响。

由图5可知,SBR-1污泥中DHA从68.44 mg/(g·h)(以MLSS计,下同)小幅上升至76.65 mg/(g·h)后大

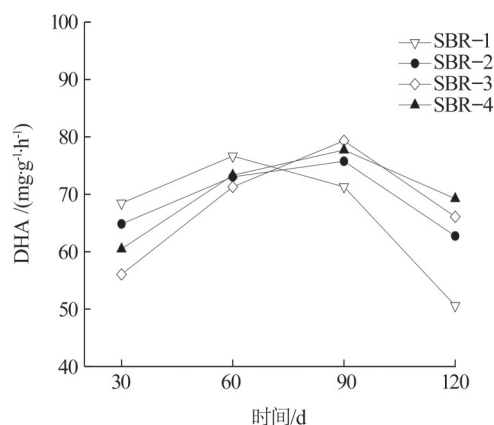


图5 各反应器活性污泥中DHA变化情况

Fig. 5 Changes of DHA in activated sludge of each reactor

幅度下降至50.59 mg/(g·h)。前60 d微生物不断适应环境,为抵御外界环境毒害作用而发出持续性应激反应^[25],导致DHA升高。60 d后活性污泥系统中微生物分泌的EPS不断降低,有毒有害物质不断积累,对微生物的毒害作用加剧,导致微生物大量死亡,微生物活性降低,DHA减少,这也解释了60 d后反应器COD、NH₄⁺-N、TN出水变差的现象。SBR-2污泥中DHA从64.83 mg/(g·h)持续上升至75.75 mg/(g·h)后降至62.73 mg/(g·h),系统微生物活性减弱,但污泥中EPS分泌量较多,能有效抵御有毒有害物质对微生物的毒害作用,保持相对较高的活性,使反应器出水稳定。SBR-3、SBR-4污泥中DHA变化趋势与SBR-2相一致,但90 d后DHA比SBR-2相对高。难降解有机物的过多累积对活性污泥总DHA以及异养菌的DHA未构成明显抑制作用,甚至表现出较高的促进作用,导致SBR-3、SBR-4

中DHA相对高。但回用水中难降解有机物累积会减弱系统对污染物的降解能力,这也是SBR-3、SBR-4的出水COD比SBR-2高的原因。而难降解有机物过多累积对硝化菌的DHA构成了明显的抑制,这解释了SBR-3、SBR-4系统中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率比SBR-2低的现象,与罗梦等^[26]的研究相似。

2.2.4 活性污泥生物相

图6为4组反应器污泥系统中微生物群落更替情况。

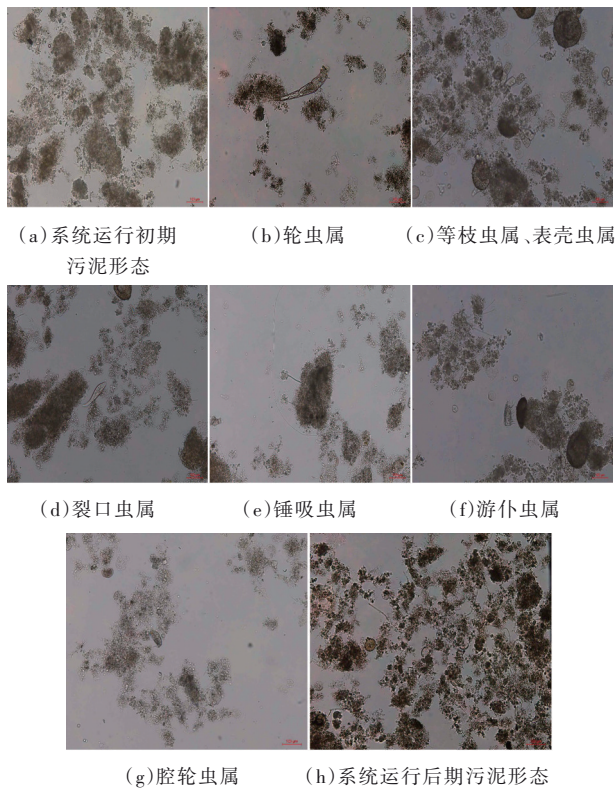


图6 反应器污泥絮体及微生物相

Fig. 6 Flocculation and microbial phase of sludge in reactor

镜检图中,图6(b)来自SBR-1;图6(c)、(e)、(f)、(g)来自SBR-2;图6(d)来自SBR-4;图6(h)来自SBR-3。各反应器运行初期,絮体密实且结构分布均匀,污泥絮体发育良好,性能稳定。各反应器污染物去除率高的原因是微生物代谢与污泥吸附共同作用的结果。随着运行时间的延长,SBR-1污泥系统中出现轮虫属,但微生物种类较少,对污泥系统环境变化适应能力较差,影响废水中污染物的去除效果。SBR-3、SBR-4污泥系统较SBR-1微生物种类较多,除了轮虫属外,还有表壳虫属、等枝虫属、裂口

虫属、锤吸虫属出现。锤吸虫属的出现表明此时的活性污泥已成熟并逐渐趋于解体,与系统运行后期的污泥形态镜检相吻合。SBR-2活性污泥系统中微生物种类较丰富,有轮虫属、钟虫属、腔轮虫属、等枝虫属、游仆虫属、锤吸虫属、表壳虫属等出现。表壳虫属及游仆虫属的出现,表明污泥停留时间长,与试验运行设定的长SRT特征相吻合。钟虫属、等枝虫属、腔轮虫属的出现,说明反应器活性污泥系统菌群结构丰富,对多变的环境适应能力强,水处理效果好。这解释了4组反应器中,SBR-2一直运行稳定、处理效果良好的现象。

2.3 微生物群落特征分析

微生物菌群结构的稳定性与功能菌群的丰度及污染物去除效果有着密切的关系,常用此指标评价污水处理系统。废机油加工回收废水属于工业废水,成分较复杂,对微生物的要求较高,试验通过16S rRNA技术分析处理此废水的功能菌群分布,以16S rRNA基因序列97%相似度水平归类OTU统计菌群的多样性结果如表4所示。

表4 各反应器菌群多样性指数

Table 4 Microbial diversity index of each reactor

样品	OTU 数量	Simpson 指数	共有 OTU 数量
初始接种污泥	1 911	0.991	715
SBR-1	1 425	0.977	
SBR-2	1 581	0.980	
SBR-3	1 748	0.975	
SBR-4	1 766	0.976	

由表4可知,初始接种污泥菌群多样性较丰富。各反应器在运行了120 d后,丰度及多样性均有所下降,说明细菌在不断地适应机油废水。4组反应器共有OTU数量为715,而从SBR-1到SBR-4中的OTU数量呈现增加的趋势,表明生化池出水稀释机油废水的方式可增加菌群丰度。同时,表4也表明系统中难降解有机物累积的增多也有利于细菌丰度的增加。SBR-2的Simpson指数比其他3组反应器高,表明生化池出水稀释机油加工回收废水的方式可增加细菌群落的多样性,有利于机油加工回收废水中污染物的降解。

图7是各反应器菌群结构在门水平上的相对丰度。

由图7可知,初始接种污泥中变形菌门(Proteo-

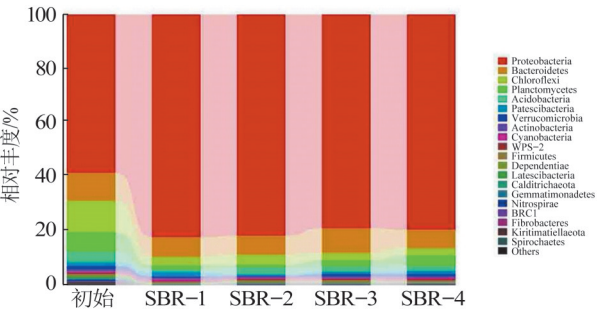


图7 细菌在门分类学水平上的分布

Fig. 7 Distribution of bacteria at the taxonomic level of phylum

bacteria)、拟杆菌门(Bacteroidetes)、绿弯菌门(Chloroflexi)、浮霉菌门(Planctomycetes)是主要优势菌群,相对丰度分别为58.5%、10.3%、11.6%、7.1%。在运行了120 d后,4组反应器中Proteobacteria均在增加,SBR-1、SBR-2达到82%左右,SBR-3、SBR-4达到79%左右,而4组反应器中Bacteroidetes、Planctomycetes、Chloroflexi均减少,表明Proteobacteria在系统活性污泥细菌群落结构中占主导地位。

各反应器细菌在纲分类中58%以上属于变形菌门,变形菌门优势菌纲分析如表5所示。

表5 变形菌门优势菌纲分析

Table 5 Analysis of dominant strain of Proteobacteria

样品	Proteobacteria			其他菌纲/%
	γ /%	δ /%	α /%	
初始	45.0	6.0	7.6	41.4
SBR-1	66.9	7.6	7.8	17.7
SBR-2	63.8	8.8	9.2	18.2
SBR-3	63.6	8.8	6.6	21
SBR-4	64.5	7.7	7.4	20.4

由表5可知, γ -Proteobacteria是变形菌门的优势菌纲,其次为 δ -Proteobacteria和 α -Proteobacteria。4组反应器中 γ -Proteobacteria由初始接种污泥的45%增加至63%~67%, δ -Proteobacteria由6%增加至8%左右,2种菌纲主要参与污水处理系统中降解有机物的过程^[27]。SBR-1、SBR-2中 α -Proteobacteria相对丰度均有所增加,SBR-3、SBR-4有所下降, α -Proteobacteria在硝酸盐的还原阶段发挥重要作用^[28]。SBR-2中 α -Proteobacteria高于其他3组反应器,表明实验室SBR生化出水稀释的方式一定程度上可增加系统脱氮功能菌的数量,改善生化降解特性。这解释了SBR-2后期脱氮效果优于其他3组反应器的原因。此外,在污水处理系统的脱氮过程中

所需的大多细菌,如氨氧化细菌、亚硝酸盐氧化细菌和反硝化细菌等,均属于3种变形菌纲^[29]。变形菌门及菌纲的增加有利于机油废水污染物的去除。

图8是各菌群结构在属水平上的相对丰度。

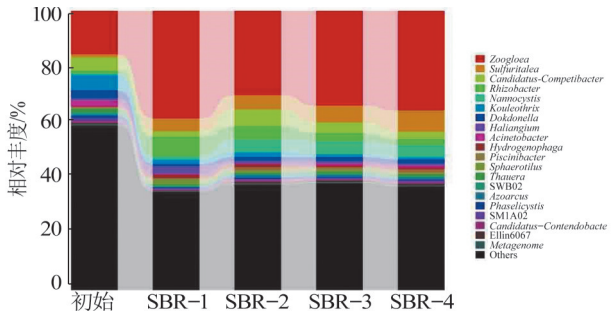


图8 细菌在属分类学水平上的分布

Fig. 8 The distribution of bacteria at the taxonomic level of genus

由图8可知,初始接种污泥中未知菌种占58%。已知菌属中动胶杆菌属(Zoogloea)占16%,是主要优势菌。在运行了120 d后,4组反应器中未知菌种降低至35%~38%,而Zoogloea属增加至30%~39%,且根杆菌属(Rhizobacter)、硫杆菌属(Sulfuritalea)、侏囊菌属(Nannocystis)、Candidatus-Competibacter属均有所增加。Zoogloea属相对丰度的增加有利于污泥系统菌胶团的形成,对活性污泥絮凝性有着重要作用^[30]。Rhizobacter属相对丰度的增加有利于污泥中有机质的增加,改善污泥的沉降性能,从而增强对污染物的去除能力。SBR-1、SBR-3、SBR-4中的Candidatus-Competibacter属均在减少,而SBR-2中的Candidatus-Competibacter属却在增加。Candidatus-Competibacter作为一种聚糖菌,是一种增长缓慢的细菌。T. W. SEVIOUR等^[31-32]的研究均发现,Candidatus-Competibacter会分泌某种胶状EPS,使EPS增加并具有胶状特性,抵御有毒有害物质对菌群的毒害作用。这解释了SBR-2中EPS高于其他3组反应器且出水较好的现象。

3 结论

(1)以实验室SBR生化出水稀释废水的方式能有效降解难处理的废机油加工回收废水。系统连续运行的120 d,COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN平均去除率分别达96.54%、88.72%、79.53%。生化出水稀释机油废水的方式在一定程度上改善了污泥系统的生化降解特性,对污染物有较高的去除能力。

(2)生化出水稀释废水的方式令机油废水中有毒的难降解有机物刺激微生物分泌更多的EPS来抵御有毒有害物质对微生物的毒害作用,保持污泥系统的平衡状态,使微生物保持较高的活性。同时,在长SRT、高MLSS下,各反应器产生的污泥量较少,表明生物法处理废机油加工回收废水的方式具有较经济的工程应用价值。

(3)参与机油废水污染物降解的主要菌门是Proteobacteria,占系统菌群的80%左右,其中 γ 、 δ 、 α -Proteobacteria在有机物及氮的去除中发挥重要作用。生化出水稀释的SBR-2中 α -Proteobacteria相对丰度高于其他方式稀释的3组反应器,脱氮效果最佳。同时,*Candidatus-Competibacter*属相对丰度也高于其他3组反应器,可促进微生物分泌更多的EPS,维持了系统的稳定。

参考文献

- [1] 孙雪景,王静,焦岩. 废水中难降解有机物共代谢实验研究[J]. 吉林建筑工程学院学报, 2011, 28(6): 28-31.
SUN Xuejing, WANG Jing, JIAO Yan. Experimental study on co-metabolic degradation in wastewater containing refractory organics[J]. Journal of Jilin Institute of Architectural and Civil Engineering, 2011, 28(6): 28-31.
- [2] 张康. 废机油的直接资源化利用及改性分级利用研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
ZHANG Kang. Researches on the direct resource utilization and modified graded utilization of used engine oil[J]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018.
- [3] 高秋. 改性丁基、丁苯橡胶吸油材料的制备及其吸油性能的研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2014.
GAO Qiu. Study on the preparation and properties of modified isobutylene isoprene rubber and styrene butadiene rubber as absorption material[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.
- [4] 丁智晖,董子萱,于水利. 难降解有机物质的生物降解技术分析[J]. 当代化工研究, 2018(1): 49-51.
DING Zhihui, DONG Zixuan, YU Shuli. The analysis of biodegradation technology in the field of refractory organic matters[J]. Modern Chemical Research, 2018(1): 49-51.
- [5] 李姗姗,朱四富,马丙瑞,等. Cu^{2+} 对序批式反应器中活性污泥胞外聚合物产量及其组分的影响[J]. 中国海洋大学学报, 2020, 50(2): 107-115.
LI Shanshan, ZHU Sifu, MA Bingrui, et al. Effects of Cu^{2+} on the production and composition of extracellular polymeric substances in the activated sludge from a sequencing batch reactor[J]. Journal of Ocean University of China, 2020, 50(2): 107-115.
- [6] 李玉平,曹宏斌,张懿. 难降解有机污染物的生物处理[J]. 现代化工, 2004, 24(4): 56-59.
LI Yuping, CAO Hongbin, ZHANG Yi. Biological treatment of bio-refractory organic pollutants[J]. Modern Chemical Industry, 2004, 24(4): 56-59.
- [7] 叶建锋. 废水生物脱氮处理新技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 26-32.
YE Jianfeng. New technology of biological denitrification treatment of wastewater[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 26-32.
- [8] 张智,陈杰云,李勇,等. 处理低温低碳源污水的倒置 A^2O 工艺强化脱氮研究[J]. 中国给水排水, 2010, 26(1): 6-8.
ZHANG Zhi, CHEN Jieyun, LI Yong, et al. Nitrogen removal from wastewater at low carbon and low temperature by reversed A^2O process[J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(1): 6-8.
- [9] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 108-216.
General Administration of Environmental Protection of the People's Republic of China. Standard methods for the examination of water and wastewater[M]. 4th edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 108-216.
- [10] PELLICER-NÀCHER C, DOMINGO-FÉLEZ C, MUTLU A G, et al. Critical assessment of extracellular polymeric substances extraction methods from mixed culture biomass[J]. Water Research, 2013, 47(15): 5564-5574.
- [11] 王孝平,邢树礼. 考马斯亮蓝法测定蛋白含量的研究[J]. 天津化工, 2009, 23(3): 40-42.
WANG Xiaoping, XING Shuli. Determination of protein quantitation using the method of coomassie brilliant blue[J]. Tianjin Chemical Industry, 2009, 23(3): 40-42.
- [12] 尹军,付瑶,荐志远,等. TTC-脱氢酶活性测定仪的研制[J]. 吉林建筑工程学院学报, 2003, 20(2): 1-4.
YIN Jun, FU Yao, JIE Zhiyuan, et al. The develop of the instrument for measuring TTC-dehydrogenase activity[J]. Journal of Jilin Architectural and Civil Engineering Institute, 2003, 20(2): 1-4.
- [13] 刘娜. SRT对生化处理系统运行特性的影响[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
LIU Na. The effects of SRT on the characteristics of the biochemical treatment system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [14] MOUSSA M S, HOOIJMANS C M, LUBBERDING H J, et al. Modelling nitrification, heterotrophic growth predation in activated sludge[J]. Water Research, 2005, 39(20): 5080-5098.
- [15] 刘燕,孔旺盛. 难降解有机物的生物污泥吸附[J]. 安全与环境学报, 2008, 8(2): 31-35.
LIU Yan, KONG Wangsheng. Biosorption for refractory pollutants[J]. Journal of Safety and Environment, 2008, 8(2): 31-35.
- [16] 方茜,张朝升,张可方,等. 污泥龄及pH值对同步硝化反硝化过程的影响[J]. 广州大学学报: 自然科学版, 2008, 7(3): 50-54.
FANG Qian, ZHANG Chaosheng, ZHANG Kefang, et al. Effect of

- sludge age and pH value on simultaneous nitrification and denitrification (SND) [J]. Journal of Guangzhou University: Natural Science Edition, 2008, 7(3): 50-54.
- [17] LIU Hong, FANG H H P. Extraction of extracellular polymeric substances (EPS) of sludges [J]. Journal of Biotechnology, 2002, 95(3): 249-256.
- [18] WANG Lingling, WANG Longfei, REN Xuemei, et al. pH dependence of structure and surface properties of microbial EPS [J]. Environmental Science and Technology, 2012, 46(2): 737-744.
- [19] 夏志红, 任勇翔, 杨垒, 等. 自养菌和异养菌胞外聚合物对活性污泥絮凝特性的影响 [J]. 环境科学学报, 2015, 35(2): 468-475.
- XIA Zhihong, REN Yongxiang, YANG Lei, et al. Influence of extracellular polymeric substances of autotrophic and heterotrophic bacterium on flocculating characteristics of activated sludge [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(2): 468-475.
- [20] ZHU Liang, LÜ Meile, DAI Xin, et al. Role and significance of extracellular polymeric substances on the property of aerobic granule [J]. Bioresource Technology, 2012, 107(2): 46-54.
- [21] 宋悦, 魏亮亮, 赵庆良, 等. 活性污泥胞外聚合物的组成与结构特点及环境行为 [J]. 环境保护科学, 2017, 43(2): 35-40.
- SONG Yue, WEI Liangliang, ZHAO Qingliang, et al. Chemical structure and environmental behavior of extracellular polymeric substances in sludge: A review [J]. Environmental Protection Science, 2017, 43(2): 35-40.
- [22] 陈福霞. OUR 和 DHA 用于评价污泥活性的比较 [J]. 石油化工安全环保技术, 2008, 24(4): 45-46.
- CHEN Fuxia. Comparison between OUR and DHA in evaluating the activity of sludge [J]. Petrochemical Safety and Environmental Protection Technology, 2008, 24(4): 45-46.
- [23] WŁODARCZYK T, STĘPNIEWSKI W, BRZEZIŃSKA M. Dehydrogenase activity, redox potential, and emissions of carbon dioxide and nitrous oxide from cambisols under flooding conditions [J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, 36(3): 200-206.
- [24] MATYJA K, MAŁACHOWSKA-JUTSZ A, MAZUR A K, et al. Assessment of toxicity using dehydrogenases activity and mathematical modeling [J]. Ecotoxicology, 2016, 25(5): 924-939.
- [25] 杨涛, 郝学凯, 陈宝玉, 等. Al^{3+} 对序批式生物膜反应器 (SBBR) 中污泥脱氢酶活性 (DHA) 和胞外聚合物 (EPS) 的影响 [J]. 环境科学学报, 2018, 38(4): 1453-1459.
- YANG Tao, HAO Xuekai, CHEN Baoyu, et al. Effect of Al^{3+} on sludge dehydrogenase activity (DHA) and extracellular polymeric substances (EPS) of activated sludge in a sequencing batch bio-film reactor (SBBR) [J]. Acta Science Circumstantiae, 2018, 38(4): 1453-1459.
- [26] 罗梦, 于茵, 周岳溪, 等. 石化废水处理过程中活性污泥毒性变化 [J]. 中国环境科学, 2017, 37(3): 963-971.
- LUO Meng, YU Yin, ZHOU Yuexi, et al. Changes of the toxicity of petrochemical wastewater to activated sludge along the treatment processes [J]. China Environmental Science, 2017, 37(3): 963-971.
- [27] 窦娜莎, 王琳. 16S rDNA 克隆文库法分析 Biostyr 曝气生物滤池处理城市污水的细菌多样性研究 [J]. 环境科学学报, 2011, 31(10): 2117-2124.
- DOU Nasha, WANG Lin. Bacteria diversity in a biostyr biological aerated filter of municipal wastewater by 16S rDNA [J]. Acta Science Circumstantiae, 2011, 31(10): 2117-2124.
- [28] HU Man, WANG Xiaohui, WEN Xianghua, et al. Microbial community structures in different wastewater treatment plants as revealed by 454-pyrosequencing analysis [J]. Bioresource Technology, 2012, 117: 72-79.
- [29] 孔小蓉. 硝化细菌制剂对海水系统硝化功能建立的影响及相关因素分析 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2010.
- KONG Xiaorong. Effects of nitrifying bacteria on construction of nitrification function in marine aquarium and analysis of related factors [D]. Qingdao: Qingdao Institute of Technology, 2010.
- [30] ZHENG Maosheng, TIAN Yuhao, LIU Tang, et al. Minimization of nitrous oxide emission in a pilot-scale oxidation ditch: Generation, spatial variation and microbial interpretation [J]. Bioresource Technology, 2015, 179: 510-517.
- [31] SEVIOUR T W, LAMBERT L K, PIJUAN M, et al. Selectively inducing the synthesis of a key structural exopolysaccharide in aerobic granules by enriching for *Candidatus "Competibacter phosphatis"* [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2011, 92(6): 1297-1305.
- [32] LIN Yuemei, KREUK M D, VAN LOOSDRECHT M C M, et al. Characterization of alginate-like exopolysaccharides isolated from aerobic granular sludge in pilot-plant [J]. Water Research, 2010, 44(11): 3355-3364.

[作者简介] 王宁(1995—), 硕士。电话: 13134300031, E-mail: wangning_1219@163.com。

[收稿日期] 2021-12-26(修改稿)