

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.07.015

# 番茄酱废水好氧颗粒污泥活性恢复及群落演替分析

包文婷<sup>1</sup>, 王维红<sup>1</sup>, 康增彦<sup>2</sup>, 董星辽<sup>3</sup>

(1. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 中建三局安装工程  
有限公司, 湖北 武汉 430079; 3. 中色科技股份有限公司, 河南 洛阳 471000)

**摘要:** 为解决新疆番茄酱加工期间产生的高浓度有机废水带来的环境问题,寻求适应其生产周期的水处理方法,在序批式反应器(SBR)中以人工合成番茄酱废水培养了185 d的好氧颗粒污泥(AGS),经-18℃冷冻储存260 d左右后作为接种污泥,进行为期130 d的活性恢复试验。结果显示,颗粒污泥在第13天开始恢复,35 d完全恢复活性,水质变得清澈,最终对COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P的平均去除率分别维持在95%、82%、80%以上。高通量宏基因组测序结果表明,物种的多样性不断变化,均匀性逐渐上升,变形菌门和拟杆菌门之和占比在80%以上,属于优势菌群。浮霉菌门中的一类细菌可以促进短程硝化反硝化,对氮循环及番茄酱加工废水的高效降解具有重要意义。微生物群落的演替表现出的协同或者竞争关系,是活性污泥微生物有效降解有机物的驱动力,对反应体系的稳定性具有重要作用。

**关键词:** 番茄酱废水; 好氧颗粒污泥; 活性恢复; 群落演替

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)07-0098-07

## Recovery of Aerobic Granular Sludge Activity and Community Evolution in Treatment of Ketchup Wastewater

BAO Wen-ting<sup>1</sup>, WANG Wei-hong<sup>1</sup>, KANG Zeng-yan<sup>2</sup>, DONG Xing-liao<sup>3</sup>

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agriculture University, Urumqi 830052, China; 2. China Construction Third Bureau Installation Engineering Co. Ltd., Wuhan 430079, China; 3. China Nonferrous Metals Processing Technology Co. Ltd., Luoyang 471000, China)

**Abstract:** This paper stored aerobic granular sludge (AGS) cultivated in a sequencing batch reactor (SBR) treating synthetic ketchup wastewater within 185 days at -18℃ for 260 days, and then reactivated the stored granules in 130 days, so as to solve the environmental problems caused by high-concentration organic wastewater generated during the processing of ketchup in Xinjiang, and determine the wastewater treatment processes adapted to its production cycle. The granular sludge began to recover on the 13th day, and completely recovered its activity on the 35th day. The effluent became clear, and the average removal rates of COD, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P eventually maintained at 95%, 82% and more than 80%, respectively. The results of high-throughput metagenomic sequencing showed that the bacterial diversity changed continuously, the uniformity gradually increased, and the total abundance of dominant bacterial phylum *Proteobacteria* and *Bacteroidetes* accounted for more than 80%. A group of bacteria in the *Planctomycetes* promoted partial nitrification and denitrification, which was of great significance for

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51968071)

nitrogen circulation and efficient degradation of ketchup processing wastewater. The synergistic or competitive relationship of microbial community evolution was the driving force for the effective degradation of organic matter by microorganisms in activated sludge, and played an important role in the stability of the system.

**Key words:** ketchup wastewater; aerobic granular sludge; activity recovery; community evolution

好氧颗粒污泥(AGS)是废水生物处理领域的一项新技术<sup>[1]</sup>,是活性污泥絮体在一定条件下自凝聚,最终形成结构致密、形状规则的微生物聚合体。成熟的AGS呈球形或椭圆形结构,颜色多为橙黄色、棕色、灰褐色。与传统的活性污泥相比,其具有良好的沉降性、较高的生物量和稳定的处理效能,因而极具发展潜质。

新疆是主要的番茄酱生产和加工基地,每年7月—10月中旬会产生大量的高浓度有机废水,此类废水超标排放会对环境造成危害<sup>[2]</sup>。而处理番茄酱这类季节性的食品加工废水,需要提前驯化污泥以适应每年的生产季。已有科研人员<sup>[2]</sup>对在SBR中采用AGS处理番茄酱生产废水的污泥颗粒化过程进行了分析,并积累了经验。另外,也有部分学者对AGS的储存与恢复性能进行了研究。高景峰等<sup>[3]</sup>分析了AGS在不同储存方法条件下的恢复效果及影响。但AGS在长期冷冻储存后处理番茄酱废水的性能恢复及微生物演替情况研究仍存在空白。

笔者对冷冻储存260 d左右的AGS进行恢复试验,探究污泥特性,并采用高通量测序技术表征恢复后的微生物群落,旨在寻求适应番茄酱生产周期的合理化废水处理方式,这对解决AGS长期驯化问题、与实际生产运用的对接和保护水资源具有现实意义。

## 1 材料与方法

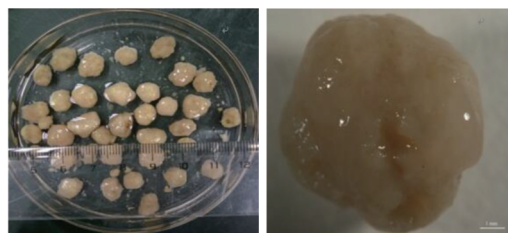
### 1.1 试验装置和运行方式

SBR反应器由有机玻璃制成,其内径为8 cm,高为100 cm,有效容积为4 L。反应器底部设有曝气装置,控制溶解氧(DO)在8 mg/L左右,pH保持在7.0~7.5之间。一个运行周期为4 h,每天运行6个周期,共进行130 d。其中,进水10 min、曝气200 min、初始沉降时间为28 min、出水2 min。

### 1.2 接种污泥

试验接种污泥取自实验室采用配制番茄酱废

水培养了185 d的AGS,质量为200 g,MLSS为5 750 mg/L,MLVSS为4 830 mg/L,MLVSS/MLSS为0.84,在-18℃环境下于清水瓶中恒温冷冻保存约260 d。AGS外观呈浅褐色球形或椭圆形,结构较为密实、光滑(见图1),颗粒粒径平均为8 mm,最大可以达到11 mm。



a. 实物照片

b. 体视显微镜照片

图1 培养185 d的接种污泥照片

Fig.1 Photos of inoculated sludge cultured for 185 days

体视显微镜显示,部分颗粒的表面存在孔洞,是为颗粒内部传递营养物质和输送气体的通道。在长期的低温环境中储存后,细菌凋亡,活细菌逐渐减少,生物活性降低,一些颗粒发生了破裂。

### 1.3 试验水质

试验水质采用人工合成的番茄酱加工废水,以鲜榨番茄汁提供碳源,COD浓度为800~1 400 mg/L, $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 分别由氯化铵( $\text{NH}_4\text{Cl}$ )和磷酸氢二钠( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ )配制,浓度分别为50、10 mg/L。采用无水碳酸钠( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )调节pH。常量元素和微量元素的配制参照文献<sup>[2]</sup>。

### 1.4 分析项目及方法

COD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 、MLSS、MLVSS和污泥容重指数(SVI)等采用《水和废水监测分析方法》(第4版)测定,DO采用溶解氧仪测定。

高通量测序:取适量不同时期的颗粒污泥分别放入已灭菌的2 mL离心管中进行提取,在0℃下保存。取4个时期的污泥样品,分别编号为D1(65 d污泥)、D2(90 d污泥)、D3(120 d小颗粒污泥,粒径

为0.45~2 mm)、D4(120 d大颗粒污泥,粒径为3~4 mm)。DNA提取和PCR引物扩增均由生工生物工程(上海)股份有限公司完成,提取的具体过程参照E. Z. N. A™ Mag-Bind Soil DNA Kit的基因组DNA提取试剂盒说明书。电泳条件为1%琼脂糖凝胶、1×TAE的电泳缓冲液、110 V的电压、15 min。扩增片段为16S rDNA的V3-V4,片段大小为400 bp左右。PCR引物为341F(CCTACGGGNGGCWGCAG)和805R(GACTACHVGGGTATCTAATCC)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 活性恢复过程中污泥的物理特性

图2为AGS活性恢复试验不同时期的照片。

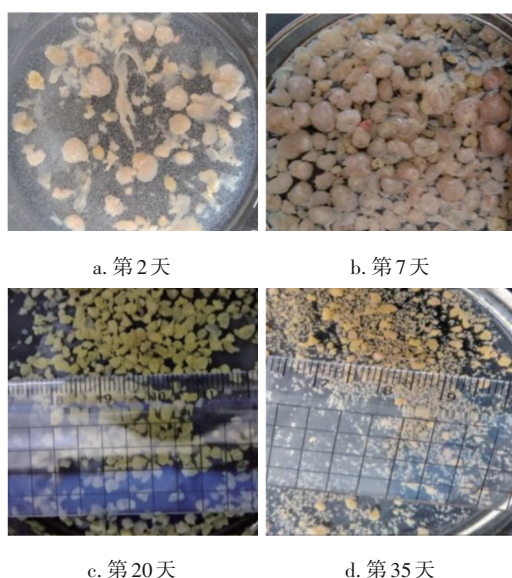


图2 AGS活性恢复试验不同时期的照片

Fig.2 Photos of AGS at different stages in the activity recovery test

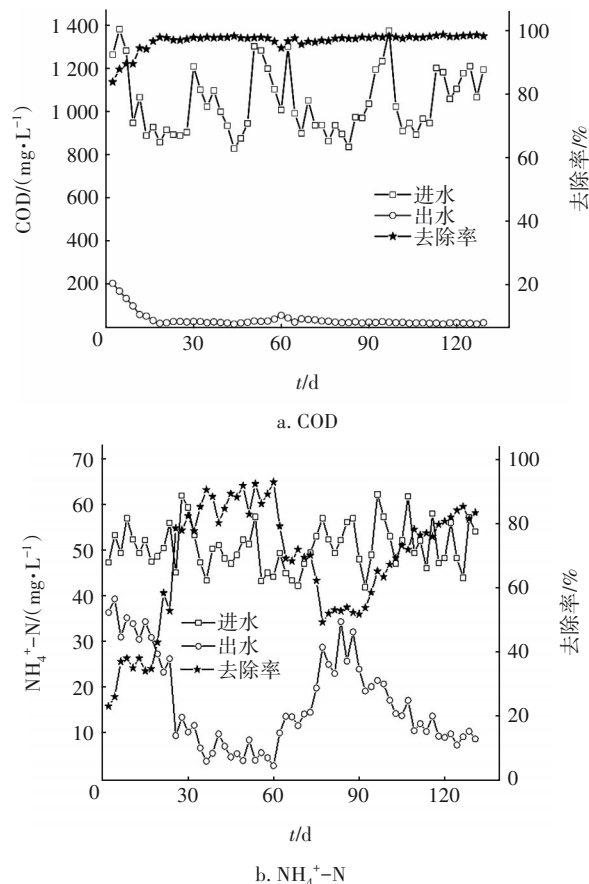
从图2可以看出,培养第2天的AGS开始松散、解体,出现带状剥落层,出水浑浊,MLSS只有4 330 mg/L,MLVSS/MLSS为0.58。接种后第7天,MLSS达到5 590 mg/L,部分颗粒停止破裂,形态由松散向圆实转化,颗粒表面变得光滑莹润、颜色加深、颗粒增多、粒径缩小。到第13天时,MLSS降到4 340 mg/L,粒径在4 mm以上的颗粒污泥占34.7%,小于0.45 mm的达到22.3%。当第20天时,大颗粒污泥消失,基本为2~4 mm的黄色扁平状小颗粒,部分空洞,平均沉降速度提高到66.47 m/h,出水水质清澈。第35天再次发生变化,空洞的颗粒污泥解体消失,成长为密实的黄褐色椭球形污泥,粒径在0.45~1 mm之间、由絮状污泥新生的小粒径污泥质量比过

半,MLSS为5 632 mg/L。第100天时,粒径为0.45~2 mm的新生颗粒占到68%,大于4 mm的颗粒质量比不超过10%,MLSS稳定在8 000 mg/L左右。最终,第130天时,0.45~4 mm的粒径占比超过75%,占主导地位。

分析原因,好氧颗粒污泥经过长期低温储存后,死菌和活菌相互分离从颗粒中脱落。起初2 d,一部分胶体溶于水中,增加了悬浮物浓度,而另一部分则解体分散,以晶核形式重新颗粒化。到第7天,出现大量的絮体污泥,说明新一代微生物已经开始生长繁殖,出水水质变好,预示着污泥活性开始恢复。紧接着通过缩短沉降时间来截留具有活性的污泥,致使MLSS降低。第35天开始,颗粒污泥结构稳定,去除率高,微生物量丰富,已经完全恢复了好氧颗粒污泥的良好性质,标志着颗粒化完成。此后,第二代新生小颗粒污泥质量比逐渐提高,系统运行趋于稳定。

### 2.2 活性恢复过程中污染物的去除效果

在污泥活性恢复过程中对污染物的去除效果如图3所示。





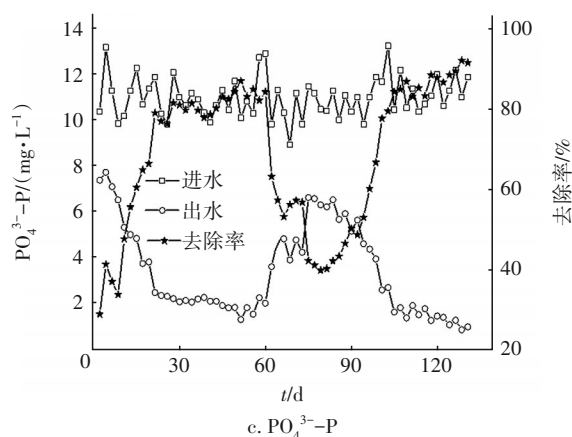


图3 活性恢复过程中污染物的去除效果

Fig.3 Effect of pollutants removal during activity recovery process

从图3(a)可知,进水COD为800~1 400 mg/L。恢复试验第2天,进、出水COD分别为1 264.47、203.63 mg/L,去除率为83.90%,达不到出水水质标准。第6天时,去除率约为90%。后期即使进水COD上下波动明显,去除率仍然保持在90%以上,最高达98.7%,平均在95%,达到了冷冻储存前的COD去除效果。说明好氧硝化细菌活性良好,已经完全恢复了AGS的除污特性。絮状污泥与颗粒污泥共存的两相污泥没有降低COD去除率。

从图3(b)可知,进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为42.12~62.46 mg/L,出水水质波动较大。第2~7天,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均为34.61 mg/L,去除率只有34.67%,活性恢复才刚开始。随后两周, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率持续上升。到第20~35天,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均浓度降到9.41 mg/L,最低为3.11 mg/L,去除率提高到80%以上,最高达到93%。但因为此时颗粒污泥的结构并不完整,多为扁平状,破坏了AGS的好氧-兼氧-厌氧空间结构,缺乏厌氧菌,致使反硝化反应不彻底。第35天后,颗粒结构重新稳定,空洞部分形成了厌氧区, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果变好。到了第60天后,缩短沉降时间至5 min,大量污泥从系统流失。同时,此时进入冬季,水温在10~15℃之间,微生物活性受到抑制,絮状污泥生长缓慢,颗粒污泥减少,使得 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效能下降。随后为提高MLSS,沉降时间调至25 min,第90天之后,颗粒污泥逐渐恢复,稳定后 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率在82%左右,但依旧不能恢复到90%以上,主要是受温度的影响。

从图3(c)可以看出,进水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度约为11 mg/L,出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度最低为0.87 mg/L,整体变化

趋势与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 相似。波动起伏后,去除率最终在第105天恢复到80%以上。

### 2.3 微生物群落高通量宏基因组测序分析

AGS内部存在厌氧、兼氧、好氧复杂的空间结构,不同的区域能够为各功能微生物提供适宜的生存条件。在硝化细菌、反硝化细菌及异养菌共同作用下,可以实现同步脱氮除磷<sup>[4-5]</sup>。因此,分析AGS的微生物群落、优势菌群有助于探究AGS活性恢复机理。为此,在研究冷冻颗粒污泥物理活性恢复和污染物去除效能的基础上,通过高通量宏基因组测序手段,对活性恢复第65、90、120天的AGS样品的16S rDNA的V3-V4进行扩增,从而获得有效序列。

#### 2.3.1 微生物的多样性

使用相似性97%的操作分类单元(OTUs),利用Mothur软件进行稀释性分析,微生物稀释曲线如图4所示。曲线光滑平整,说明检测到的微生物信息量大且稳定,4个样品的曲线都趋于平坦,表明测序结果涵盖了样品中绝大多数微生物信息<sup>[6]</sup>。

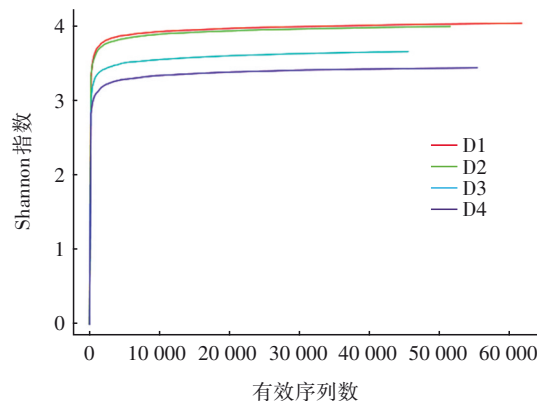


图4 微生物群落稀释性曲线

Fig.4 Rarefaction curves of the bacterial communities

图5为微生物群落的Venn图。

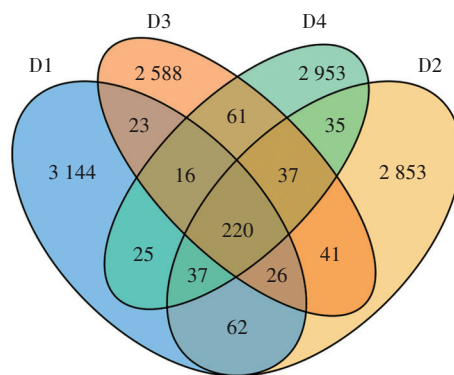


图5 微生物群落的Venn图

Fig.5 Venn diagram of the bacterial communities

从图5可知,4个样品的总OTUs数为13260个,共同重叠的为220个,占OTUs总数的1.66%,表明伴随着颗粒化过程,微生物群落组成发生了较大改变且存在一定的相似性。

当达到饱和测序时,所获得的物种最大数量由Chao1指数表征<sup>[7]</sup>。颗粒污泥形成过程中,Chao1指数的排序为D1>D4>D3>D2,见表1,表明样品丰富度不断发生变化。D1时期物种丰富度较高,D2、D3阶段物种丰富度降低,D4阶段又得到恢复。

表1 微生物群落的Alpha多样性指数

Tab.1 The  $\alpha$ -diversity indices of bacterial community

编号	序列数	OTUs数	Shannon指数	ACE指数	Chao1指数	相似水平/%
D1	61 385	3 553	4.04	238 057.12	82 233.48	95
D2	51 243	3 311	4.00	152 879.31	54 586.94	94
D3	45 258	3 012	3.66	159 908.90	57 688.38	94
D4	55 074	3 384	3.45	236 885.65	75 512.77	94

### 2.3.2 微生物群落在门水平上的差异

不同时期污泥样品细菌在门水平上的分布情

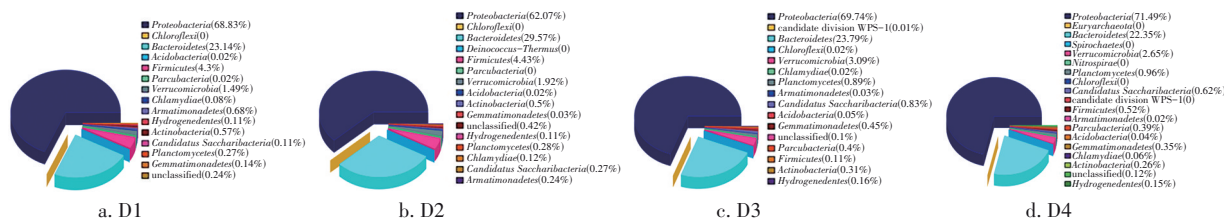


图6 不同时期细菌在门水平上的分布

Fig.6 Distribution of bacteria at phylum level in different periods

从图6还可以看出,污泥中的微生物菌群也发生着变化。疣微菌门(Verrucomicrobia)从D1时期的1.49%上升到D3时期的3.09%,Firmicutes由4.3%降到了0.11%。同时期装甲菌门(Armatimonadetes)的变化也较大,由0.68%下降到0.03%。在此期间,污泥浓度也是在不断变化的,Verrucomicrobia的增多是由于污泥浓度增大引起的。同时,系统对 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的去除率也在逐渐升高,这说明Firmicutes和Armatimonadetes的减少对 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的去除有一定的积极作用,这是微生物群落演替的结果。

值得一提的是,浮霉菌门(Planctomycetes)的占比在D1~D4时期持续上升。而Planctomycetes的浮霉菌属(Planctomyces)和小梨形菌属(Pirellula)等都属于专性好氧菌。与此同时,在Planctomycetes中还

况如图6所示。可知,在4个检测样本(D1~D4)中,细菌在门水平上分类数目分别为14、13、16、14。从4个样品的检测结果来看,无论在哪个阶段,变形菌门(Proteobacteria)都占到细菌门类总数60%以上,拟杆菌门(Bacteroidetes)在各个阶段的占比均在20%以上,可见Proteobacteria和Bacteroidetes为主要门类,对降解番茄酱生产废水起着重要作用,这与陈启伟等<sup>[8]</sup>的结果一致。Proteobacteria由于涵盖的菌株丰富和代谢途径的多样性,作为优势门类在各种废水生物处理系统中也被报道,如焦化废水、宠物食品工业废水、制药和炼油厂废水等<sup>[9-11]</sup>。同一时期不同粒径的污泥因其结构不同,微生物群落存在差异。D3、D4为同一时期不同粒径的污泥样本,两样本间的微生物存在细微差异。较明显的是绿弯菌门(Chloroflexi)在D3时期出现(占0.02%),然而在D4中又消失不见,说明此菌门存在于120 d时的小粒径(0.45~2 mm)污泥中。另外,厚壁菌门(Firmicutes)在D3中的含量为0.11%,在D4中的含量为0.52%。

存在一类和Planctomyces等关系较远的细菌,由于暂时无法分离获得纯菌株,因此尚未能正式命名和分类(如Candidatus Kuenenia、Candidatus Scalindua、Candidatus Brocadia属),它们能够利用亚硝酸盐在缺氧环境下氧化铵离子生成氮气来获得能量,因此称作厌氧氨氧化菌<sup>[12]</sup>。在该过程中,对 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 的去除效果变好,说明该种菌对废水中 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 的去除做出了贡献。这也显示,该类细菌的富集将有助于短程硝化反硝化过程,对水生态环境的氮循环及番茄酱加工废水的高效降解具有重要意义。

### 2.3.3 微生物群落在目水平上的差异

各样品细菌在目水平上的分布情况如图7所示。可以看出,红环菌目(Rhodocyclales)、鞘脂杆菌目(Sphingobacteriales)为主要菌目,两菌目占比之和约为50%。伯克霍尔德氏菌目(Burkholderiales)、黄

杆菌目(*Flavobacteriales*)和嗜甲基菌目(*Methylophilales*)的变化较大。*Burkholderiales*在D3时期数量最多,而D3时期系统絮体污泥的占比较小,说明*Burkholderiales*在颗粒污泥中的量要多于在絮体污泥中的,这与已报道的*Burkholderiales*为番茄酱废水的主要降解菌结论一致<sup>[8]</sup>。*Flavobacteriales*的分布情况与*Burkholderiales*相反,其在D2中的占比要大于在D1和D3中的,更容易存在于絮体污泥中。*Methylophilales*的分布情况与*Burkholderiales*类似,其在颗粒污泥中的占比大于在絮体污泥中的。

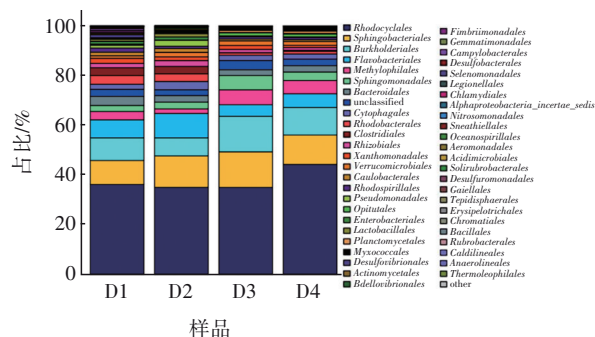


图7 不同时期细菌在目水平上的分布

Fig.7 Distribution of bacteria at order level in different periods

从图7还可以看出,一些细菌在生长过程中被淘汰了,同时伴随一部分新的菌目出现。如梭菌目(*Clostridiales*)存在于D1和D2样品中,而在D3样品中消失。再如红细菌目(*Rhodobacteriales*)在D1与D2中的数量明显高于在D3与D4中的。可见,不同时期不同菌群表现出的协同或者竞争关系,即微生物群落的演替是活性污泥微生物有效降解有机物的驱动力,对反应体系的稳定性具有重要作用。

### 3 结论

① 恢复初期颗粒污泥最大膨胀到11 mm并出现破裂解体现象,13 d后颗粒污泥开始稳定恢复活性,到第20天时,部分存在空洞,出水水质变清澈,逐渐恢复了AGS性能。第35天以后,空洞的颗粒污泥解体、消失,密实的椭球污泥形成,已经完全恢复了AGS的良好性质,标志着颗粒化完成。最终,第130天时,0.45~4 mm的粒径占比超过75%,占主导地位,MLSS稳定在8 000 mg/L左右。

② 恢复再生后的颗粒污泥对COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的平均去除率分别在95%、82%和80%以上。高通量测序结果显示,不同时期菌群的多样性

不断变化,物种的均匀性逐渐上升。在目水平上,变形菌门和拟杆菌门之和占到总污泥菌群80%以上,是优势菌群。浮霉菌门的占比在D1~D4时期持续上升,它的属中有一类细菌称作厌氧氨氧化菌,对氮循环及番茄酱加工废水的高效降解具有重要意义。在目水平上差异明显,红环菌目和鞘脂杆菌目是处理番茄酱废水的主要菌目。伯克霍尔氏菌目在颗粒污泥中的分布要多于絮体污泥,也是番茄酱废水的主要降解菌。

### 参考文献:

- [1] 苑泉,吴远远,金正宇,等.水解酸化对好氧颗粒污泥形成及脱氮除磷的影响[J].环境科学研究,2018,31(2):360-368.  
YUAN Quan, WU Yuanyuan, JIN Zhengyu, et al. Impacts of hydrolysis and acidification on the formation of aerobic granular sludge and its nitrogen and phosphorus removal [J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(2): 360-368 (in Chinese).
- [2] 王燕杉,王维红,董星辽,等.SBR反应器处理番茄酱生产废水的污泥颗粒化过程[J].中国给水排水,2019,35(1):25-30.  
WANG Yanshan, WANG Weihong, DONG Xingliao, et al. Sludge granulation in SBR reactor for treatment of tomato paste processing wastewater [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(1): 25-30 (in Chinese).
- [3] 高景峰,苏凯,陈冉妮,等.不同储存方法对好氧颗粒污泥恢复的影响[J].应用基础与工程科学学报,2011,19(3):408-415.  
GAO Jingfeng, SU Kai, CHEN Ranni, et al. Re-activation characteristics of aerobic granular sludge preserved by different methods [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2011, 19(3): 408-415 (in Chinese).
- [4] 侯爱月,李军,王昌稳,等.不同好氧颗粒污泥中微生物群落结构特点[J].中国环境科学,2016,36(4):1136-1144.  
HOU Aiyue, LI Jun, WANG Changwen, et al. Characteristics of microbial community structure in different aerobic granular sludge [J]. China Environmental Science, 2016, 36(4): 1136-1144 (in Chinese).
- [5] 林岚,张彦隆,曹文志,等.同步脱氮除磷技术研究进展[J].工业水处理,2019,39(10):7-13.  
LIN Lan, ZHANG Yanlong, CAO Wenzhi, et al.



- Review on simultaneous nitrogen and phosphorus removal technologies [J]. *Industrial Water Treatment*, 2019, 39(10): 7-13 (in Chinese).
- [6] 樊晓燕, 高景峰, 王时杰, 等. 同步脱氮除磷系统中两种颜色好氧颗粒污泥的微生物群落特征[J]. *环境科学研究*, 2017, 30(8): 1287-1294.
- FAN Xiaoyan, GAO Jingfeng, WANG Shijie, *et al.* White and yellow aerobic granular sludge microbial structures appearing in a simultaneous nitrogen and phosphorus removal system using high-throughput sequencing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30(8): 1287-1294 (in Chinese).
- [7] 冯殿宝, 王维红, 王燕杉, 等. 以黏土为载体的好氧颗粒污泥培养及其对番茄废水的处理[J]. *应用与环境生物学报*, 2019, 25(1): 199-205.
- FENG Dianbao, WANG Weihong, WANG Yanshan, *et al.* Clay-cultured aerobic granular sludge and its use in the treatment of tomato-paste processing wastewater [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2019, 25(1): 199-205 (in Chinese).
- [8] 陈启伟, 苏馈足, 陈丁丁, 等. 处理番茄酱加工废水的活性污泥颗粒化过程[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(2): 369-378.
- CHEN Qiwei, SU Kuizu, CHEN Dingding, *et al.* Process of aerobic granulation of activated sludge treating tomato paste processing wastewater [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(2): 369-378 (in Chinese).
- [9] IBARBALZ F M, FIGUEROLA E L, ERIJMAN L. Industrial activated sludge exhibit unique bacterial community composition at high taxonomic ranks [J]. *Water Research*, 2013, 47(11): 3854-3864.
- [10] 杨文焕, 郝梦影, 董炎, 等. 焦化废水处理中含氮化合物转化与菌群结构关系[J]. *水处理技术*, 2020, 46(12): 114-118, 133.
- YANG Wenhuan, HAO Mengying, DONG Yan, *et al.* Relationship between transformation of nitrogen-containing compounds and microbial community structure in coking wastewater treated by two-stage A/SMBBR [J]. *Technology of Water Treatment*, 2020, 46(12): 114-118, 133 (in Chinese).
- [11] MA Q, QU Y Y, SHEN W L, *et al.* Bacterial community compositions of coking wastewater treatment plants in steel industry revealed by Illumina high-throughput sequencing [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 179: 436-443.
- [12] 纪树兰, 崔丹红, 周明璟, 等. 基于城市污水好氧颗粒污泥脱氮除磷系统种群多样性研究[J]. *北京工业大学学报*, 2013, 39(7): 1100-1108.
- JI Shulan, CUI Danhong, ZHOU Mingjing, *et al.* Bacteria diversity analysis of aerobic granular sludge for nitrogen and phosphorus removal in municipal wastewater treatment system [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2013, 39(7): 1100-1108 (in Chinese).
- 
- 作者简介: 包文婷(1997-), 女, 新疆乌鲁木齐人, 硕士, 主要从事水处理理论与技术方面的研究。
- E-mail: 296977482@qq.com
- 收稿日期: 2021-01-08
- 修回日期: 2021-02-07

(编辑: 任莹莹)

贯彻执行《中华人民共和国水污染防治法》