

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.19.012

# 饱和填充生物膜反应器生物膜周期性变化特征

郑榆凯<sup>1</sup>, 欧阳肖<sup>1</sup>, 朱仁诚<sup>1</sup>, 徐彬欣<sup>1</sup>, 胡湛波<sup>1</sup>, 孙全民<sup>2</sup>

(1. 广西大学 资源环境与材料学院, 广西 南宁 530004; 2. 广西益江环保科技股份有限公司, 广西 南宁 530007)

**摘要:** 以饱和填充生物膜反应器为研究对象,分析其填料生物膜的周期性变化特征,以及由此引起的出水水质周期性变化情况。结果表明,在一个运行周期内,饱和填充生物膜反应器出水COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N和SS浓度呈现先增后降的趋势,TP呈现持续增加的趋势,而TN没有明显的周期性变化;生物膜生物量在0~5 h增长缓慢,在5~20 h增长迅速,在20~30 h增速放缓;生物膜胞外聚合物(EPS)中多糖(PS)和蛋白质(PN)成分含量以及PS/PN均呈现先增后降的趋势;生物膜表观产率系数( $Y_{obs}$ ) 在0~5 h无明显变化,而在5~30 h呈现出迅速增长的趋势;表观镜检结果表明,填料生物膜在前期仅有少量表面光滑的杆菌,在10~30 h出现表面包裹黏液物质的球菌,且细菌数量和种类明显增多。

**关键词:** 饱和填充生物膜反应器; 生物膜; 周期性变化特征; 胞外聚合物

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)19-0075-06

## Periodic Alteration Characteristics of Biofilm in a Saturated Packed Biofilm Reactor

ZHENG Yu-kai<sup>1</sup>, OUYANG Xiao<sup>1</sup>, ZHU Ren-cheng<sup>1</sup>, XU Bin-xin<sup>1</sup>, HU Zhan-bo<sup>1</sup>,  
SUN Quan-min<sup>2</sup>

(1. School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Guangxi Yijiang Environmental Protection Technology Co. Ltd., Nanning 530007, China)

**Abstract:** The periodic alteration characteristic of the biofilm in a saturated packed biofilm reactor and the consequent periodic alterations of the effluent quality were analyzed. In one operating cycle, the effluent COD, BOD<sub>5</sub>, NH<sub>3</sub>-N and SS from the saturated packed biofilm reactor exhibited a trend of initial increase followed by decrease, TP demonstrated a trend of continuous increase, while TN showed no obvious periodic variation. The biofilm biomass rose gradually within the period of 0 h to 5 h, rapidly from 5 h to 20 h, and then decelerated from 20 h to 30 h. The components of polysaccharide (PS) and protein (PN) within the extracellular polymeric substance (EPS) of the biofilm initially increased and subsequently decreased, and the PS/PN ratio demonstrated similar trend of change. The apparent yield coefficient of the biofilm ( $Y_{obs}$ ) remained relatively unchanged within the 0~5 h period, but increased rapidly from 5 h to 30 h. The biofilm microscopic images indicated that only a few bacilli with smooth

基金项目: 广西重点研发计划项目(桂科AB19110001); 广西科技基地和人才专项(桂科AD17195092)

通信作者: 胡湛波 E-mail: huzhanbo@gxu.edu.cn

surface were present in the bacteria in the initial stage. Cocci coated with mucous substances emerged within 10 h to 30 h, and the number and species of bacteria increased significantly.

**Key words:** saturated packed biofilm reactor; biofilm; periodic alteration characteristic; extracellular polymeric substance

饱和填充生物膜反应器是一种基于移动床生物膜反应器(MBBR)发展和改进而来的新型污水处理技术,具有出水效果好、占地面积小、运行能耗低等优点,已在国内外多地成功投产应用<sup>[1]</sup>。饱和填充生物膜反应器中填料的填充率一般设置为70%~90%,填料在反应器内流动极为缓慢,处于一种“饱和”状态,单位容积内可附着的生物量远大于传统MBBR。此外,使用饱和填充生物膜反应器的污水处理设施出水水质可满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准,且处理设施占地面积小。由于该技术的填料填充率极高,曝气装置产生的气泡可在填料间的缝隙停留较长时间,有利于好氧微生物摄取氧气,氧气传质速率比传统MBBR高一倍以上,可减少曝气量,大大降低整体运行能耗。为避免填料生物膜的过度生长,降低反应器的运行效能,需要对填料进行定期冲洗,因此该技术在实际运行中分为正常处理模式(20~30 h)和冲洗模式(0.5~1.0 h)<sup>[2]</sup>。在冲洗模式中,反应器内水位提高,填料填充率降低,使填料得以流动,其中老化和松散的生物膜在填料的互相碰撞中脱离,最终随水流排出反应器,待水位降低、填料填充率恢复到设定值后,反应器进入正常处理模式<sup>[3]</sup>。正常处理模式和冲洗模式交替进行,饱和填充生物膜反应器具有明显的周期性运行特征。

前期研究发现,饱和填充生物膜反应器直接出水的悬浮物(SS)浓度很低,可保持在20 mg/L以下,并且在各个运行周期内均呈现先降后升的变化趋势,具有明显的周期性特征<sup>[4]</sup>。填料生物膜是饱和填充生物膜反应器的核心,生物膜中微生物生长速率和代谢活性会直接影响反应器对污染物的去除效果<sup>[5]</sup>,因此上述出水的周期性变化可能是由填料生物膜的周期性变化引起的。然而,饱和填充生物膜反应器填料生物膜周期性变化未见报道。鉴于此,笔者探讨了饱和填充生物膜反应器一个运行周期的变化过程,包括填料生物膜生物量、胞外聚合物(EPS)、表观产率系数( $Y_{\text{obs}}$ )和表观镜检图像的周

期性变化特征,分析由生物膜变化引起的多种出水指标周期性变化情况,旨在为揭示饱和填充生物膜反应器高效运行的深层次机理提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置及运行方法

工艺流程如图1所示。原水箱是聚乙烯塑料桶,容积为200 L。缺氧池为亚克力塑料材质的圆柱体,内径为30 cm,高为120 cm,工作容积约为70 L,缺氧池中投放K3填料,填充率约为30%。饱和填充生物膜反应器为亚克力塑料材质的长方体,长、宽、高分别为30、30和120 cm,工作容积约为90 L。该反应器底部已均匀铺设曝气管,采用曝气泵曝气,通过气体流量计调节曝气量。饱和填充生物膜反应器中投放K3填料,并在填料上设置一个带孔隔板,确保运行过程中填料全部浸没在液面之下。沉淀池为竖流式沉淀池,采用溢流孔出水方式,底部设有污泥回流管和排泥管。接种污泥取自某污水厂回流污泥,将接种污泥投入厌氧池及饱和填充生物膜反应器各3 L,补充适量配水后开始挂膜,待生物膜挂膜成功且出水水质稳定后开始试验。

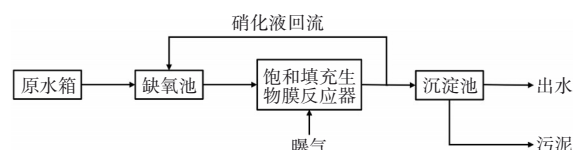


图1 工艺流程

Fig.1 Flow diagram of process

饱和填充生物膜反应器在一个运行周期内有两种运行模式,即正常处理模式(持续时间为30 h)和冲洗模式(持续时间为0.5 h),如图2所示。采用正常处理模式时,污水由原水箱进入缺氧池,在缺氧环境下发生反硝化反应,之后进入饱和填充生物膜反应器,经处理后部分污水回流至前置反硝化池,其余部分进入竖流式沉淀池,最后溢流排放。采用冲洗模式时,关闭饱和填充生物膜反应器出水口,前端缺氧池处理后的污水和沉淀池的部分出水进入反应器,使水位上升,填料填充率下降,开始在

反应器内自由移动,填料上松散的生物膜由于水流的作用开始脱离,待冲洗结束后,打开反应器出水口,使水位下降至预设值,而后进入正常处理模式,开始下一个运行周期。

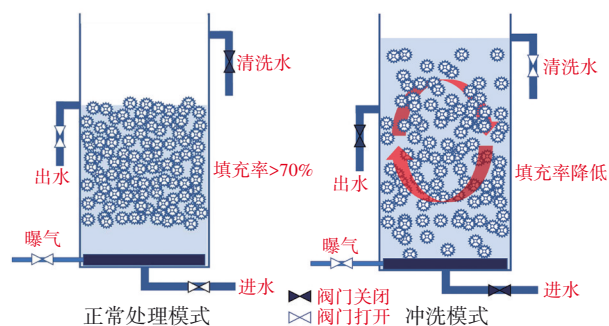


图2 饱和填充生物膜反应器运行方式

Fig.2 Operation mode of saturated packed biofilm reactor

## 1.2 装置运行工况

试验使用人工配制的模拟污水,即在自来水中溶解乙酸钠、葡萄糖、淀粉、 $\text{NH}_4\text{Cl}$ 、 $\text{KNO}_3$ 、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 及微量元素。经实测,其COD浓度为 $(252.86 \pm 8.36)$  mg/L、 $\text{BOD}_5$ 浓度为 $(178.69 \pm 11.94)$  mg/L、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度为 $(30.26 \pm 3.25)$  mg/L、TN浓度为 $(58.71 \pm 6.07)$  mg/L、TP浓度为 $(7.39 \pm 1.55)$  mg/L、SS浓度为 $(1.63 \pm 0.42)$  mg/L。采用正常处理模式时,填料填充率为85%、持续时间为30 h、水力停留时间(HRT)为7.0 h、曝气量为 $2.2 \text{ m}^3/\text{h}$ 、进水量为 $0.16 \text{ L}/\text{min}$ 、硝化液回流比为200%;采用冲洗模式时,填料填充率为60%、持续时间为0.5 h。开展试验前,装置已稳定运行15 d,其间每日定时取样测得出水COD、 $\text{BOD}_5$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP和SS浓度分别为 $(19.67 \pm 2.94)$ 、 $(4.78 \pm 1.48)$ 、 $(1.86 \pm 0.93)$ 、 $(12.45 \pm 2.32)$ 、 $(0.33 \pm 0.18)$ 和 $(5.51 \pm 1.46)$  mg/L,基本满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A排放标准。

## 1.3 分析项目及方法

COD采用重铬酸盐法(HJ 828—2017)测定; $\text{BOD}_5$ 采用稀释与接种法(HJ 505—2009)测定;氨氮采用纳氏试剂分光光度法(HJ 535—2009)测定;TN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ 636—2012)测定;TP采用钼酸铵分光光度法(GB 11893—89)测定;SS采用重量法(GB 11901—89)测定。

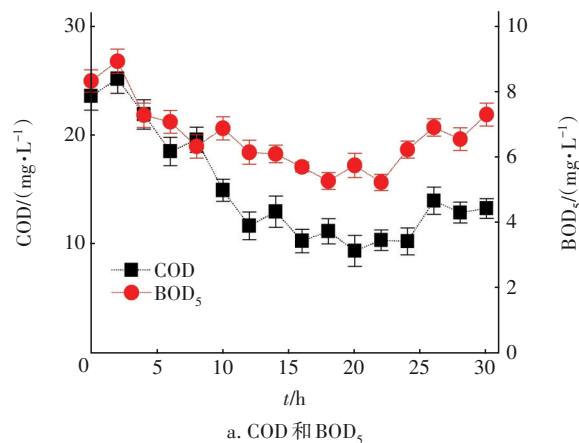
对填料生物膜的分析包括生物量、EPS、 $Y_{\text{obs}}$ 和表观镜检。测定生物量时,需剥落填料上的生物膜,采用重量法定量。EPS根据与生物膜结合紧密

程度分为溶解性EPS(S-EPS)、松散结合EPS(LB-EPS)和紧密结合EPS(TB-EPS),并以苯酚-硫酸法测定各EPS样品中的多糖(PS)组分,以考马斯亮蓝法测定EPS样品中的蛋白质(PN)组分。测定填料生物膜 $Y_{\text{obs}}$ 时,需要用干净小刀刮下填料上的生物膜,并对这些生物膜进行培养,测定一段时间内 $\text{BOD}_5$ 和混合液悬浮固体浓度(MLSS)的变化量,并通过文献[6]计算 $Y_{\text{obs}}$ ,即降解单位 $\text{BOD}_5$ 的生物膜产率(以MLSS计)。填料生物膜经真空冷冻干燥后,采用扫描电子显微镜(SEM)进行表征。

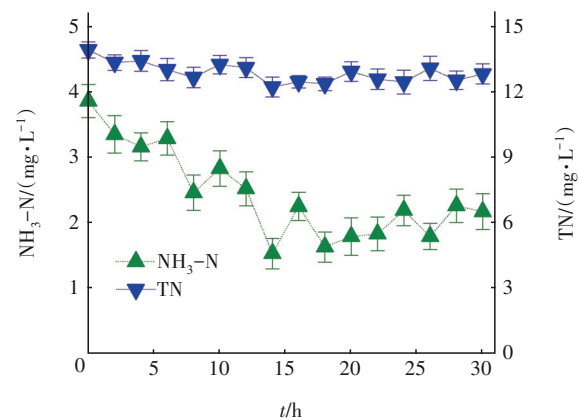
## 2 结果与分析

### 2.1 污染物去除效果周期性变化

饱和填充生物膜反应器在一个运行周期内水质的变化如图3所示。可知,出水COD浓度在0~16 h呈现逐渐下降的趋势,在16~24 h保持稳定,而在24~30 h呈现缓慢上升的趋势。出水 $\text{BOD}_5$ 浓度在0~22 h呈现逐渐下降的趋势,而在22~30 h呈现缓慢上升的趋势。出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度在0~14 h呈现逐渐下降的趋势,在16~30 h趋于稳定。出水TN浓度在0~30 h变化较为平稳。



a. COD和 $\text{BOD}_5$



b.  $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TN



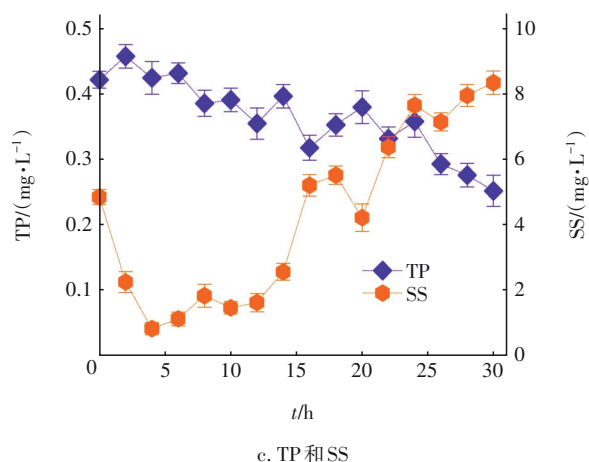


图3 饱和填充膜生物膜反应器在一个运行周期内水质的变化

Fig.3 Change of water quality within an operating cycle of saturated packed biofilm reactor

出水TP浓度在0~30 h呈现逐渐下降的趋势。出水SS浓度在0~4 h呈现迅速下降的趋势,而在4~12 h呈现缓慢上升的趋势,并在12~24 h急剧上升,最后在24~30 h上升趋势减缓。

## 2.2 生物膜生物量周期性变化

饱和填充生物膜反应器在一个运行周期中,生物膜生物量的变化如图4所示。

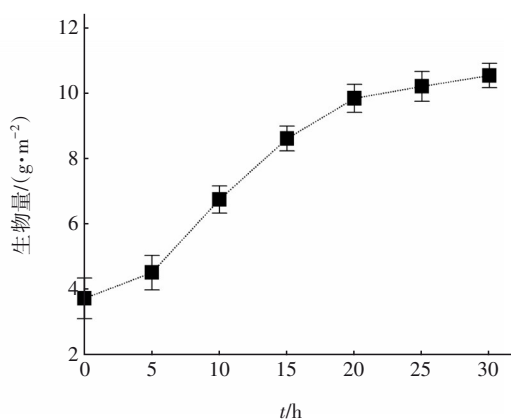


图4 生物量在一个运行周期内的变化

Fig.4 Change of biomass within an operating cycle

由图4可知,在一个运行周期中,饱和填充生物膜反应器填料生物量随时间的推移呈现明显的“S型”增长,即填料生物膜生物量的变化与微生物的生长曲线相对应。其中在0~5 h生物量增长较缓慢,在5~20 h生物量增长迅速,基本上符合对数增长的趋势,此时填料上微生物大多处于其生长曲线的对数期。而在20~30 h生物量增长速率放缓,填料上微生物群落种间竞争增强,使得各群落生长速

率放缓,此时填料的生物量增长变慢。结合饱和填充生物膜反应器在一个运行周期内出水水质情况分析,在运行前期,填料生物膜上生物量较少,随着生物量的增长,饱和填充生物膜反应器对COD、BOD<sub>5</sub>和NH<sub>3</sub>-N的去除率呈现逐渐增加的趋势。而在周期运行后期,饱和填充生物膜反应器填料上的生物膜微生物群落种间竞争明显加剧,衰亡的微生物残体增多,生物膜出现堆积现象<sup>[7]</sup>,影响了微生物对COD、BOD<sub>5</sub>和NH<sub>3</sub>-N的去除效果。

## 2.3 生物膜胞外聚合物周期性变化

饱和填充生物膜反应器填料上生物膜外包裹的EPS对其本身有重要的生理功能,可起到富集并初步降解底物、保护微生物胞体等作用,且EPS各组分的含量可以反映微生物对环境的适应情况。饱和填充生物膜反应器在一个运行周期中,生物膜EPS的变化见表1。

表1 EPS在一个运行周期内的变化

Tab.1 Change of EPS within an operating cycle

t/h	PS/(mg·g <sup>-1</sup> SS)			PN/(mg·g <sup>-1</sup> SS)		
	S-EPS	LB-EPS	TB-EPS	S-EPS	LB-EPS	TB-EPS
0	0.82	4.25	14.21	2.68	12.63	48.32
5	1.86	8.65	18.63	4.46	28.15	54.15
10	2.36	11.72	21.97	6.23	35.73	59.91
15	2.17	12.13	25.96	7.12	42.15	67.25
20	1.63	12.65	24.63	5.96	38.26	61.63
25	2.35	11.35	19.16	6.42	37.23	58.36
30	3.86	10.56	16.72	5.23	38.86	57.31

从表1可以看出,填料生物膜的EPS以PN为主、以PS为辅。其中,填料生物膜LB-EPS和TB-EPS的PS成分呈现明显的先升后降趋势,而S-EPS的PS成分出现明显波动。在0~15 h,三种EPS组分的PS均呈现极快的增长趋势,说明此时生物膜生长十分旺盛,新合成细胞量大。而在15~30 h,LB-EPS和TB-EPS中的PS基本呈下降趋势,但S-EPS却仍呈上升趋势,这可能是由于在运行15 h后,微生物种间竞争加剧,各微生物群落活性开始受到底物浓度的限制,并且少数群落开始进入生长曲线的衰亡期,此时衰亡细胞量增加,使得结合较为紧密的LB-EPS和TB-EPS的PS呈下降趋势。饱和填充生物膜反应器填料生物膜S-EPS和LB-EPS的PN呈现明显的先升高后波动趋势,而TB-EPS的PN呈现明显的先升后降趋势。在0~15 h时,三种EPS的PN均呈

现快速增长的趋势,此时由于新合成生物量大,胞外酶分泌量呈现增长的趋势,PN成分快速增加。而在运行15 h后,由于反应器中微生物开始出现明显的种间竞争,少部分群落开始进入衰亡期,生物膜总活性下降,TB-EPS的PN组分下降;但大部分微生物群落仍处于稳定期,生物膜微生物仍有一定的活性,胞外酶可能仍比较稳定,表现为结合程度较低的S-EPS和LB-EPS的PN没有出现明显的下降趋势。

饱和填充生物膜反应器在一个运行周期内,生物膜EPS中PS和PN成分含量及PS/PN的变化如图5所示。

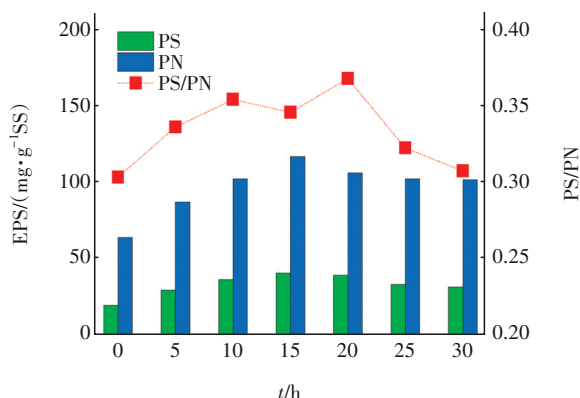


图5 PS和PN在一个运行周期内的变化

Fig.5 Change of PS and PN concentrations within an operating cycle

PS/PN能够反映生物膜与填料结合的紧密程度,一般来说PS/PN越大,生物膜与填料结合越紧密<sup>[7]</sup>。饱和填充生物膜反应器在一个运行周期中,PS/PN出现先升后降的趋势,表明生物膜与填料的结合紧密程度先增后减,其中0~20 h PS/PN呈增加趋势,此时生物膜与填料结合程度增加;而在20 h后,生物膜出现一定程度的“老化”现象,松散结构增多,生物膜与填料结合程度明显下降。结合饱和填充生物膜反应器在一个运行周期内的出水情况发现,0~20 h生物膜与填料结合紧密程度不断提高,且生物膜活性较高,反应器对COD、BOD<sub>5</sub>和NH<sub>3</sub>-N的去除率呈现升高的趋势;而在20 h后,生物膜与填料结合程度下降,使得部分生物膜脱离填料随水流排出反应器,使得出水SS浓度明显增加。

#### 2.4 生物膜表观产率系数周期性变化

饱和填充生物膜反应器在一个运行周期内生物膜的 $Y_{obs}$ 变化如图6所示。可知,在一个运行周期

中,饱和填充生物膜反应器填料生物膜的 $Y_{obs}$ 随时间的推移呈现逐渐增长的趋势。其中0~5 h的 $Y_{obs}$ 较低,无明显增长;而5~30 h的 $Y_{obs}$ 呈现迅速增长的趋势。有研究表明,初始底物/生物量浓度( $S_0/X_0$ )与 $Y_{obs}$ 在数值上呈现一定的反比关系<sup>[8]</sup>,结合上述生物量周期变化情况分析,在0~5 h填料生物量较低,此时反应器内 $S_0/X_0$ 较高,使得填料生物膜的 $Y_{obs}$ 较低且增长缓慢;而在5~30 h,随着反应器内填料生物膜生物量的增加, $S_0/X_0$ 迅速降低,微生物合成自身物质的速率增加,表现为 $Y_{obs}$ 的增速加快。结合饱和填充生物膜反应器在一个运行周期内的出水情况发现,0~5 h反应器的 $S_0/X_0$ 较高,但是COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TN、TP和SS的出水效果十分理想,达到了《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准。其原因可能是在周期运行前期出现了明显的微生物代谢解耦联作用,此时填料微生物分解代谢产生ATP的速率要大于其合成代谢消耗的速率,在微生物分解污染物代谢活性很高的同时合成自身物质速率较低,生物量增长较慢。5~20 h,代谢解耦联作用减弱,微生物生长速率明显增加,生物膜对COD、BOD<sub>5</sub>和NH<sub>3</sub>-N的去除率随着 $Y_{obs}$ 的增加而提高。20~30 h,微生物竞争加剧,在 $Y_{obs}$ 升高的同时,饱和填充生物膜反应器对污染物的去除效果呈现缓慢下降的趋势。

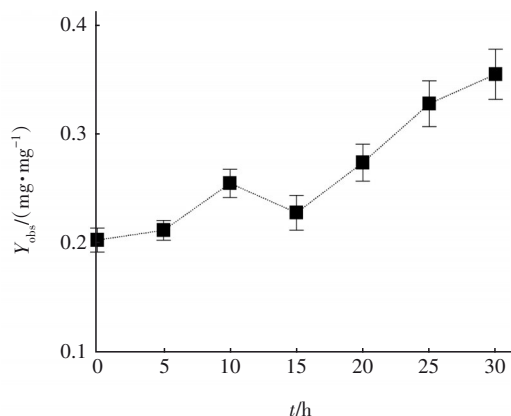


图6  $Y_{obs}$ 在一个运行周期内的变化

Fig.6 Change of  $Y_{obs}$  within an operating cycle

#### 2.5 生物膜表观镜检图像的周期性变化

饱和填充生物膜反应器在一个运行周期中,生物膜在不同处理时间的表观镜检结果表明,由于上一周期的冲洗操作,初期细菌较少,以杆菌为主,有少量的球菌,且菌体表面比较光滑。0~20 h细菌数量和菌体分泌的EPS等胞外物质增多,生物膜厚度

明显增加;特别在10~20 h,球菌数量明显增多,这些球菌表面包裹着黏液等物质。20~30 h,细菌数量没有明显增长,细菌仍以杆菌、球菌为主,说明此时反应器内可能出现了底物的竞争,菌群的增长速率相较于前期明显下降。结合饱和填充生物膜反应器在一个运行周期中的出水情况发现,在0~20 h,填料表面的细菌数量明显增多,即单位面积填料上的微生物增多,使得反应器对COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N和TP的去除率呈现逐渐增加的趋势。而在20~30 h,填料表面镜检结果没有明显变化,印证了前述生物膜微生物竞争加剧的情况,反应器对污染物的去除效果不再呈现上升的趋势。

### 3 结论

① 饱和填充生物膜反应器对主要污染物的去除效果呈现周期性变化。即在一个运行周期内,COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N和SS的出水浓度呈现先增后降的趋势,TP出水浓度呈现持续增加的趋势,而TN出水浓度没有明显的周期性变化。

② 饱和填充生物膜反应器在一个运行周期内,生物膜生物量呈现“S型”增长;EPS中S-EPS逐渐增加,LB-EPS和TB-EPS先快速增加而后缓慢下降,PS/PN先增加后下降; $Y_{obs}$ 在前期缓慢增加而后快速增加。表观镜检结果表明,前期填料生物膜细菌数量较少,以表面光滑的杆菌为主,中期细菌数量增多,出现表面包裹黏液物质的球菌,后期细菌数量和形态没有明显变化。

③ 结合饱和填充生物膜反应器出水效果和填料生物膜的周期变化可知,在运行前期可能出现明显的代谢解偶联作用,使得污染物去除率较高的同时生物量增长率较低;运行后期生物膜上的微生物种间竞争明显加剧,使得污染物去除率有所下降;整个运行周期中,生物膜与填料的结合程度呈现先升后降的趋势。

### 参考文献:

- [1] WANG X D, BI X J, HEM L J, *et al.* Microbial community composition of a multi-stage moving bed biofilm reactor and its interaction with kinetic model parameters estimation [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 218: 340-347.
- [2] XIN G, LOPES M P, CRESPO J G, *et al.* A continuous nanofiltration+evaporation process for high strength rubber wastewater treatment and water reuse [J]. *Separation and Purification Technology*, 2013, 119(3): 19-27.
- [3] WANG S, SAVVA I, BAKKE R. A full-scale hybrid vertical anaerobic and aerobic biofilm wastewater treatment system: case study [J]. *Water Practice and Technology*, 2018, 14(1): 189-197.
- [4] RATHNAWEERA S S, RUSTEN B, KORCZYK K, *et al.* Novel biofilm reactor for denitrification of municipal wastewater [J]. *Water Science and Technology*, 2018, 78(7): 1566-1575.
- [5] 张新波,张祖敏,宋姿,等. 不同生物膜载体下MBBR中微生物群落变化特征[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(11): 63-68.  
ZHANG Xinbo, ZHANG Zumin, SONG Zi, *et al.* Characteristics of microbial communities in MBBR with different biofilm carriers [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(11): 63-68(in Chinese).
- [6] ZHENG Y K, HU Z B, TU X J, *et al.* In-situ determination of the observed yield coefficient of aerobic activated sludge by headspace gas chromatography [J]. *Journal Chromatography A*, 2020, 1610: 460560.
- [7] 张恒亮,段亮,姚美辰,等. MBBR-MBR组合工艺处理生活污水效能及膜污染研究[J]. *环境工程技术学报*, 2019, 9(3): 245-251.  
ZHANG Hengliang, DUAN Liang, YAO Meichen, *et al.* Study on performance and membrane fouling of MBBR-MBR combined process for treatment of domestic wastewater [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, 9(3): 245-251(in Chinese).
- [8] CHUDOKA P, MOREL A, CAPDEVILLE B. The case of both energetic uncoupling and metabolic selection of microorganisms in the OSA activated sludge system [J]. *Environmental Technology*, 1992, 13(8): 761-770.

作者简介:郑榆凯(1994-),男,广西玉林人,硕士研究生,主要研究方向为水污染控制技术。

E-mail:014052@163.com

收稿日期:2020-06-02

修回日期:2020-07-05

(编辑:任莹莹)